

Haarajoen koepenkereen painumalaskentakilpailu

Loppuraportti

Tiehallinnon selvityksiä 54/2001



Haarajoen koepenkereen painumalaskentakilpailu

Loppuraportti

Tiehallinnon selvityksiä 54/2001

*Kansikuva: Haarajoen koepenger
valmistumishetkellä 1997*

ISSN 1457-9871
ISBN 951-726-803-3
TIEH 3200700

Edita Oyj
Helsinki 2001

Julkaisua myy/saatavana:
Tiehallinto, julkaisumyynti
faksi 0204 22 2652
e-mail julkaisumyynti@tiehallinto.fi
www.tiehallinto.fi/julk2.htm



TIEHALLINTO
Opastinsilta 12 A
PL 33
00521 HELSINKI
Puhelinvaihde 0204 22 150

Asiasanat: geotekniset laskelmat, penkereet, painumat, savi
Aiheluokka: 62

TIIVISTELMÄ

Savikerrosten painumien arvioinnilla on suuri merkitys uusien teiden ja vanhojen teiden korjauksia suunniteltaessa. Vaikka painumien laskenta on perinteinen geotekninen tehtävä, ei toteutuvia painumia osata kuitenkaan usein arvioida riittävällä tarkkuudella. Varsinkin pystyjoituksen yhteydessä on painumisnopeuslaskelmissa paljon parantamisen varaa.

Painumalaskentakilpailussa tehtävänä oli arvioida Uudellemaalla Järvenpään Haarajoelle rakennetun koepenkereen painumia, huokospaineita ja sivusiirtymiä kahden vuoden ajalta rakentamisen jälkeen. Kolme metriä korkean penkereen toinen puoli rakennettiin maanvaraisena ja toinen puoli tehtiin pystyjoitetun maapohjan varaan painumien nopeuttamiseksi. Laskentakilpailussa oli kaksi vaihetta: Ensimmäisessä vaiheessa kilpailijoilla oli käytettävissään tavanomaisia tiensuunnittelussa käytettävissä olevia pohjatutkimustuloksia kuitenkin niin, että ödometrikokeiden tuloksia oli paljon tavanomaista enemmän. Ensimmäisessä vaiheessa kilpailijat laskivat vain painumia. Toisessa vaiheessa kilpailijoille annettiin myös kolmiakselikokeiden tuloksia numeeristen menetelmien käytön mahdollistamiseksi. Painumien lisäksi kilpailijoiden oli toisessa vaiheessa laskettava myös sivusiirtymiä ja huokosvedenpaineita.

Kahdessa vuodessa koepenkereen maanvarainen osa painui enimmillään 372 mm ja pystyjoitetun osan suurin painuma oli 633 mm. Ensimmäisen vaiheen hyväksytyissä vastauksissa (seitsemän työryhmää) lasketut maksimipainumat vaihtelivat maanvaraisella osalla 100 - 500 mm välillä ja pystyjoitetulla osalla 400 - 1800 mm välillä. Toisen vaiheen viidessä vastauksessa vastaavat lasketut painumat olivat maanvaraisella osalla 100 - 900 mm ja pystyjoitetulla osalla 300 - 1200 mm. Varsinkin pystyjoitetun osuuden painumia olivat lähes kaikki kilpailijat arvioineet paljon toteutuneita suuremmiksi. Toisessa vaiheessa laskijoiden arvioimat huokosvedenpaineet poikkesivat toisistaan jopa 50 kPa, eikä laskentatuloksia voida pitää kovinkaan onnistuneina varsinkaan maanvaraisen penkereen alla. Pystyjoitetun penkereen alla huokosvedenpainelaskelmien tarkkuus oli kohtuullinen. Sivusiirtymien kehittyminen laskettiin penkereen ja maan rajapinnasta, ja mitatut siirtymät olivat pieniä. Eräät kilpailijat osasivat arvioida sivusiirtymien kehittymisen melko tarkasti.

Koepenkereen mittauksia jatketaan edelleen, ja erinomaisia mittaustuloksia on käytetty ja tullaan käyttämään kansainvälisestikin hyväksi painumalaskennan ja maan mekaanisen mallintamisen testaamisessa.

Lojander, Matti & Vepsäläinen, Pauli: Haarajoen koopenkereen painumalaskentakilpailu. Loppuraportti. [Competition to calculate settlements at Haarajoki test embankment. Final Report]. Helsinki 2001. Finnish Road Administration. Finnra Reports 54/2001. 50 p. + app. 7 p. ISSN 1457-9871, ISBN 951-726-803-3, TIEH 3200700.

Keywords: geotechnical calculations, embankments, settlements, clay

SUMMARY

It is of great significance to be able to predict the settlement of embankments on clay layers when discussing the reconstruction of old roads or building new roads. Although the calculation of settlements is a traditional geotechnical procedure the accurate estimation of the settlement is not perfected, especially when we are considering vertical drainage and numerical calculations.

The given task in the settlement calculation competition was to estimate the settlement, pore pressure and lateral movement for the period of two years after construction of the Haarajoki test embankment in Järvenpää, Uusimaa. The embankment was three meters high and half of it was built on vertical drains to hasten the settlements. There were two phases in the competition; in the first phase the competitors had at their disposal the traditional in situ and laboratory test results noting that there were more oedometer tests than normal. At this stage only the settlement was calculated. During the second phase the triaxial test results were given to the competitors thus facilitating the use of numerical methods in calculation.

During the two years the side of the embankment built on the virgin soil layers had a settlement of 372 mm while the side built on vertical drains had a settlement of 633 mm. The results of the first phase of the competition (seven parties) had a maximum settlement for the side of the embankment built on the virgin soil layers between 100 – 500 mm and for the side built on vertical drains 400 – 1800 mm. The results of the second phase of the competition had a maximum settlement for the side of the embankment built on the virgin soil layers between 100 – 900 mm and for the side built on vertical drains 300 – 1200 mm and the pore pressures had a variance of 50 kPa. All the competitors estimated the settlements of the vertically drained portion to be much larger than the measured settlement. The pore pressure estimates were more accurate for the vertically drained section while quite inaccurate for the virgin soil section. The lateral movement of the embankment was predicted quite accurately.

The measurements of the test embankment are still going on. These results are being used internationally to improve settlement calculations and the testing of mechanical models. As a result of the settlement competition, settlement calculations have improved due to more accurate interpretations of the laboratory tests and choice of parameters. Also there are ongoing projects that are aimed at improving the accuracy of settlement predictions.

ESIPUHE

Tielaitos järjesti vuosina 1997 - 1999 kansainvälisen painumalaskentakilpailun, jossa tehtävänä oli laskea savikolle rakennettavan koepenkereen painumat, siirtymät ja maaperässä tapahtuvat huokospaineen muutokset. Kilpailussa oli sarjat erikseen perinteisille ja uusille laskentamenetelmille. Painumalaskentakilpailu ja muut Haarajoen koepenkereeseen liittyvät tutkimukset ovat osa käynnissä olevaa projektia S4 Tien pohjarakenteet.

Koepenger rakennettiin kilpailuvastausten luovuttamisen jälkeen elokuussa 1997 ja mittauksia tehtiin 2 vuoden ajan elokuuhun 1999. Koepenkereen mittauksia on jatkettu kilpailun päättymisen jälkeen.

Kilpailun tavoitteena oli geoteknisten laskentamenetelmien tason parantaminen ja uusien laskentamenetelmien käyttökelpoisuuden testaaminen käytännön mitoituksessa.

Kilpailua varten perustettuun suunnittelutoimikuntaan kuuluivat Pentti Salo, pj, Mikko Smura, Eijamari Pietikäinen, sihteeri ja Panu Tolla Tielaitoksesta, Markku Tamminne Valtion teknillisestä Tutkimuskeskuksesta (VTT), Matti Lojander Teknillisestä korkeakoulusta ja Jukka Pöllä Fundus Oy:stä ja Pekka Salmenhaara De Neef Finland Oy:stä.

Kilpailun palkintolautakuntaan kuuluivat Tielaitoksen nimeäminä Matti-Pekka Rasilainen, pj, Pekka Kontiala, Risto Pelttari ja Aarno Valkeisenmäki Tielaitoksesta, Eero Slunga Teknillisestä korkeakoulusta ja Suomen Rakennusinsinöörien liiton (RIL) nimeäminä Seppo Viita OL-Consulting Oy:stä ja Hans Weckman Fundus Oy:stä sekä sihteerinä ilman äänioikeutta Pentti Salo Tielaitoksesta.

Loppuraportin tavoitteena on julkistaa painumalaskentakilpailusta saadut arvokkaat kokemukset, joita voidaan hyödyntää suunnittelu- ja tutkimusmenetelmien kehittämisessä sekä painumalaskennan parametrien määrittämisessä.

Loppuraportin kirjoittamistyön ovat tehneet Matti Lojander ja Pauli Vepsäläinen Teknillisestä korkeakoulusta ja ohjausryhmään ovat kuuluneet Pentti Salo Tiehallinnosta ja Mikko Smura, Panu Tolla ja Jyrki Nikkinen Tieliikelaitoksesta. Lisäksi raportissa on mukana kilpailun voittaneiden puheenvuorot.

Helsinki, elokuu 2001

Tiehallinto

Tieliikelaitos
Konsultointi

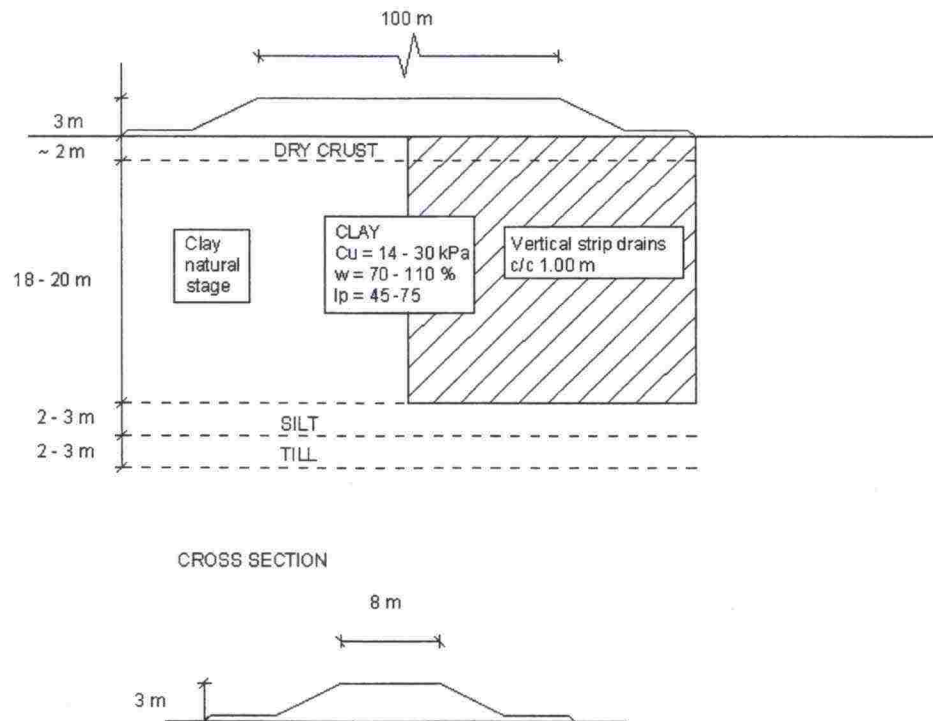
SISÄLTÖ

TIIVISTELMÄ	3
SUMMARY	4
ESIPUHE	5
SISÄLTÖ	6
1. KILPAILUN ESITTELY	7
2. MITTAUSTULOSTEN ESITTELY	11
3. MAANVARAINEN PENDER	20
3.1. Esitystapa	20
3.2. Laskentatulokset	21
3.3. Klassiset menetelmät	25
3.4. Numeeriset menetelmät	26
3.5. Vertailua klassisten ja numeeristen menetelmien välillä	26
4. PYSTYOJITETTU PENDER	28
4.1. Esitystapa	28
4.2. Laskentatulokset	28
4.3. Klassiset menetelmät	30
4.4. Numeeriset menetelmät	32
4.5. Vertailu klassisten ja numeeristen menetelmien välillä	33
4.6. Hitaan painumisen syyt	34
5. KILPAILUTULOKSET JA PALKITTUJEN PUHEENVUORO	35
5.1. Kilpailutulokset	35
5.2. Palkittujen puheenvuoro	36
6. JATKOTUTKIMUKSET	43
7. KILPAILUSTA SAADUT KOKEMUKSET	45
8. YHTEENVETO	47
KIRJALLISUUS	48
LUETTELO HAARAJOEN KOEPENGERTÄ KOSKEVISTA ARTIKKELEISTA JA ESITELMISTÄ	49

1. KILPAILUN ESITTELY

Tielaitos julkisti 3.3.1997 painumalaskentakilpailun, jossa "tehtävänä oli laskea savikolle rakennettavan koepenkereen painumat, siirtymät ja maaperässä tapahtuvat huokospaineen muutokset mahdollisimman tarkasti sekä esittää selkeät ja perustellut laskelmat käyttäen kohteeseen parhaiten soveltuvaa laskentamenetelmää."/Kilpailukutsu 1997/.

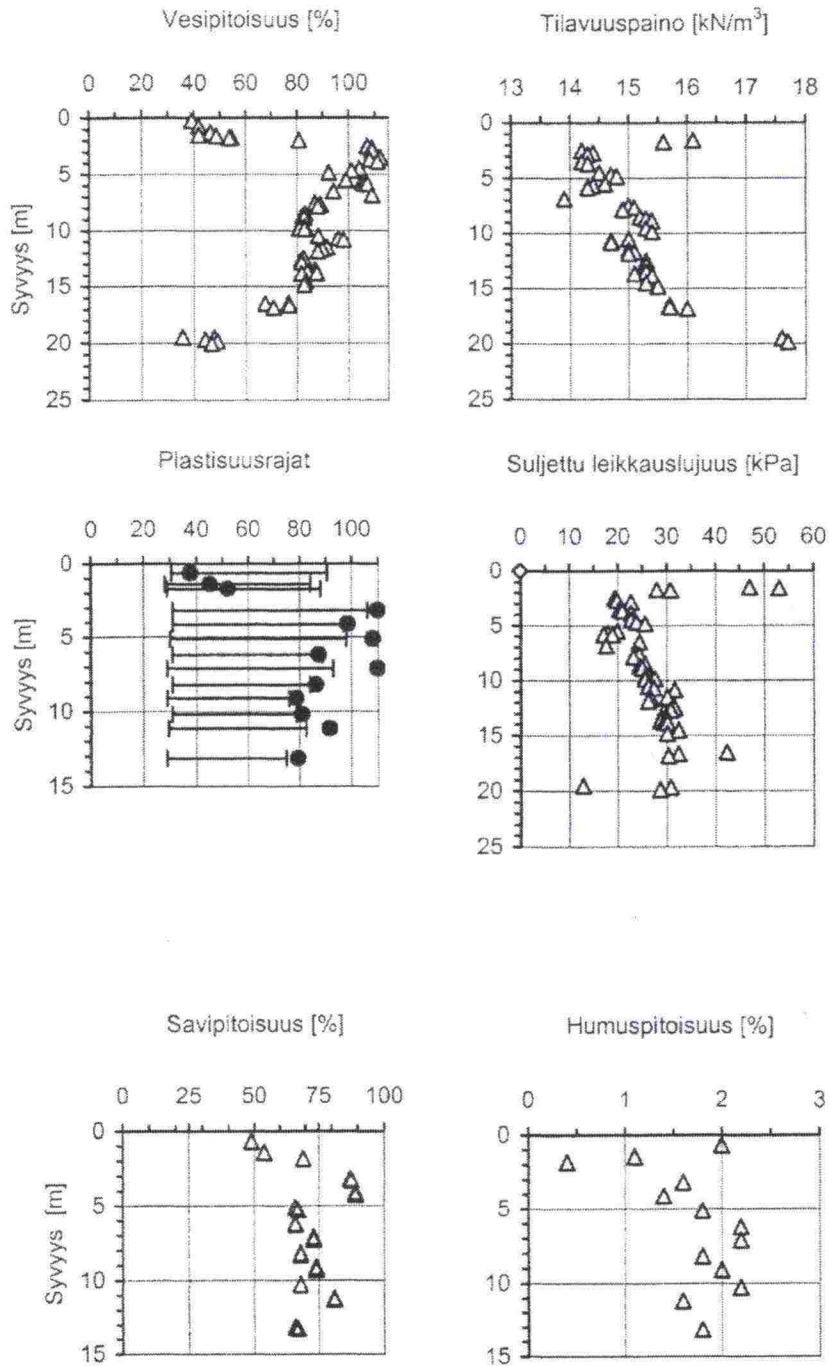
Järjestelytoimikunta kokoontui ensimmäisen kerran kesällä 1995 ja kun penkere rakennettiin elokuussa 1997, oli valmistelu aika riittävä. Koepenkereen suunnittelu tapahtui Tielaitoksella. Teknillisen korkeakoulun pohjarakennuksen ja maamekaniikan laboratorio avusti Tielaitosta häiriintymättömien maanäytteiden otossa, ja suuri osa laboratorio-tutkimuksista tehtiin Teknillisellä korkeakoululla. Koepenkereen pituus on 100 m, leveys harjalta 8 m ja korkeus 2,9 m (kuva 1).



Kuva 1. Haarajoen koepenger. Mitat ja maaperä yleispiirteisesti.

Penkereen toinen pää on maanvarainen ja toinen pää pystyojitettu (c/c 1,00 m). Pengermateriaali on soraa, jonka tilavuuspaino on $20,7 \text{ kN/m}^3$. Kilpailijat tekivät laskelmansa kolmella tilavuuspainon arvolla ($20, 21$ ja 22 kN/m^3), sillä etukäteismittausten perusteella ei voitu olla varmoja mihin tiiviyteen instrumentoitu penkere saadaan tiivistettyä. Penkere rakennettiin vaiheittain ja instrumentointi tehtiin 40 cm murskekerroksen levittämisen jälkeen

(pystyöjitetulla osuudella pystyöjituksen jälkeen). Tämän jälkeen lopullinen penger rakennettiin kahdessa viikossa 0,5 m kerroksissa kahden päivän välein. Maapohja on lievästi ylikonsolidoitunutta, lihavaa savea (kuva 2).

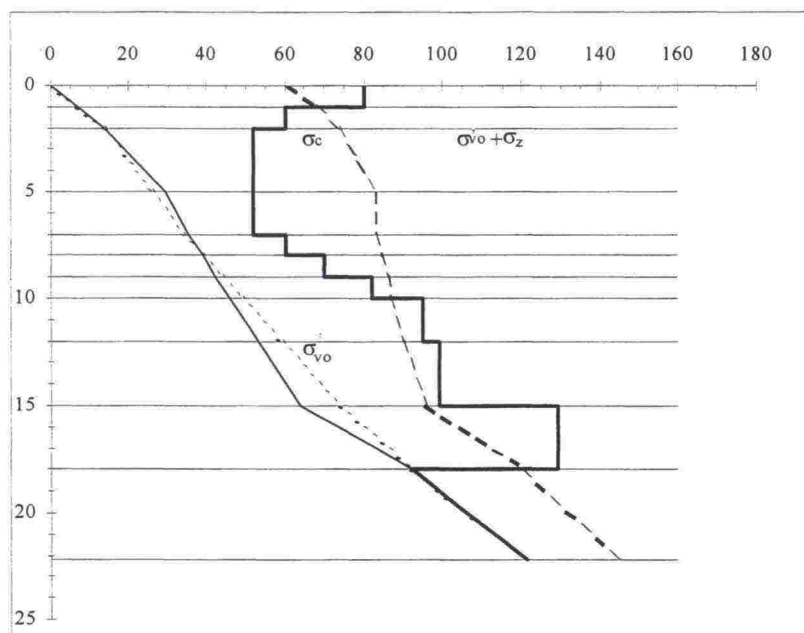


Kuva 2.

Esimerkki Haarajoen koepenkereen luokitusominaisuuksista ja kartiokokeella määritellyistä leikkauslujuuksista. [Saarelainen 1997]

Savikerroksen paksuus on yli 20 m. Koepenkeren korkeus on niin suuri, että lähes kaikissa kerroksissa kuormituksen aiheuttama lisäjännitys ylittää ödometrikokeilla mitatun esikonsolidaatiopaineen (kuva 3). Pohjaveden pinnan tasoksi on mitattu maanpinta ja etukäteen asennetuista huokospainemittareista on voitu havaita 4 m syvyydellä 3 kPa alipainetta ja 15 m syvyydellä 10 kPa ylipainetta. Vallitseva tehokas jännitys (σ'_{vo}) on näistä syistä johtuen varsinkin ylimmissä kerroksissa hyvin pieni lisäkuormitukseen verrattuna. Sekä portaittaisissa että jatkuvapuristeisissa ödometrikokeissa esikonsolidaatiopaineen ylittymisen jälkeen painuma kasvaa rajusti (moduuliluku $m = 3...5$ ja jännitysekspONENTTI $\beta = -0,4...-1,2$). Tyypillisiä ödometrikokeiden tuloskäyriä on esitetty liitteessä 1.

Kerros nro	Kerroksen alaraja m	Tehokas tilavuus- paine γ' , kN/m ³	Laskettu tehokas jännitys kPa	Vallitseva tehokas jännitys σ'_{vo} , kPa	Lisä- jännitys σ_z , kPa	$\sigma'_{vo} + \sigma_z$, kPa	Esikonsoli- daatio- jännitys σ'_c , kPa	Kon- soli- daatio- tila
1	1	7	7	7	61,0	68,0	80	VYK
2	2	7	14	14	59,8	73,8	60	VYK
3	5	4	26	29	53,7	82,7	52	LYK
4	7	4	34	35	47,6	82,6	52	LYK
5	8	5	39	39	45,1	84,1	60	LYK
6	9	5	44	42	43,9	85,9	70	LYK
7	10	5	49	46	40,3	86,3	82	LYK
8	12	5	59	53	36,6	89,6	95	VYK
9	15	5	74	64	31,7	95,7	99	VYK
10	18	6	92	92	28,1	120	129	VYK
11	22,2	7	121	121	23,2	145	121	NK



Kuva 3. Haarajoen koepenger. Jännitysjaumat savikerroksissa. Vallitseva jännitys on merkitty katkoviivalla, σ'_{vo} on vallitseva tehokas jännitys, σ_z on lisäjännitys ja σ'_c on portaittaisesta ödometrikokeesta määritetty esikonsolidaatiojännitys. [Saarelainen 1997]

Konsolidaatiokertoimen arvo normaalistikonsolidoituneella alueella on noin $0,1 \text{ m}^2/\text{a}$ ja ylikonsolidoituneella alueella $2...10 \text{ m}^2/\text{a}$. Konsolidaatiokertoimen valinta – varsinkin niillä ohjelmilla, joihin voi antaa vain yhden arvon kerrosta kohti – on näin ollen erittäin ratkaiseva painumalaskennan lopputulosten kannalta. Laboratoriossa ödometrikokeilla mitatut vedenläpäisevyyskertoimien arvot ovat suuruusluokaltaan $10^{-9}...10^{-10} \text{ m/s}$. Vedenläpäisevyyskerroin pienenee voimakkaasti muodonmuutoksen kasvaessa. Haarajoen koepenkereen laboratoriotutkimusten ja laskentatulosten (painumalaskentakilpailussa esitettyjen ja muualla julkaistujen) perusteella on vakavasti harkittava nykyistä täsmällisempää konsolidaatiokertoimien valintatapaa tai siirtymistä käyttämään vedenläpäisevyyskertoimen initiaaliarvoa ja muuttumiskerrointa painuman suhteen (liite 1). Tämä asia esitetään yksityiskohtaisemmin liitteessä 2, Teknillisessä korkeakoulussa on tämän asian tiimoilta tehty vuodesta 1997 alkaen perustutkimusta ja kerätty aineistoa tutkimusta varten, (Ravaska & Vepsäläinen 2001).

Pohjasuhteet ovat hankalat ja monimutkaiset. Maapohjassa on runsaasti (5...10) geoteknisiä kerroksia. Maapohja on anisotrooppista. Nämä seikat ovat osaltaan vaikuttaneet siihen, että laskentatulokset ovat poikenneet toisistaan hyvin paljon.

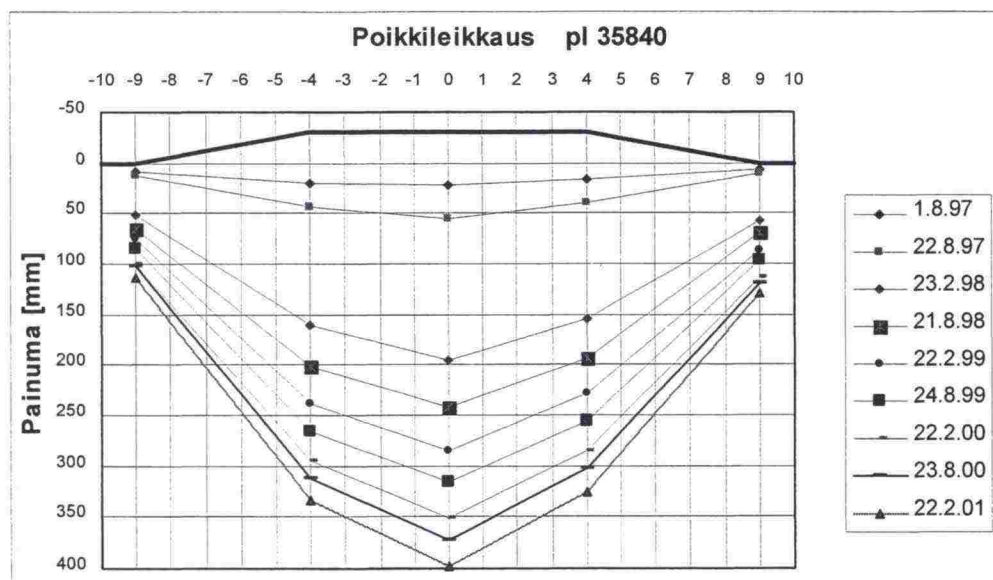
Koepenkereen rakentaminen ja seurantamittaukset tehtiin seuraavasti:

- Pystyjoitus tehtiin 28.7 – 30.7.1997. Työalustat oli tehty sitä ennen.
- Rakentaminen aloitettiin 11.8.1997. Penger korotettiin 0.5 metrin kerroksissa. Yhden kerroksen teko kesti kaksi päivää.
- Rakentaminen päättyi 22.8.1997.
- Painumatarkistimet asennettiin penkereen päälle 25.8.1997.
- Ensimmäiset mittaukset tehtiin 31.7.1997. Rakentamisaikana mittauksia tehtiin päivittäin, kuitenkin 8.8.1997 lähtien viikon välein.

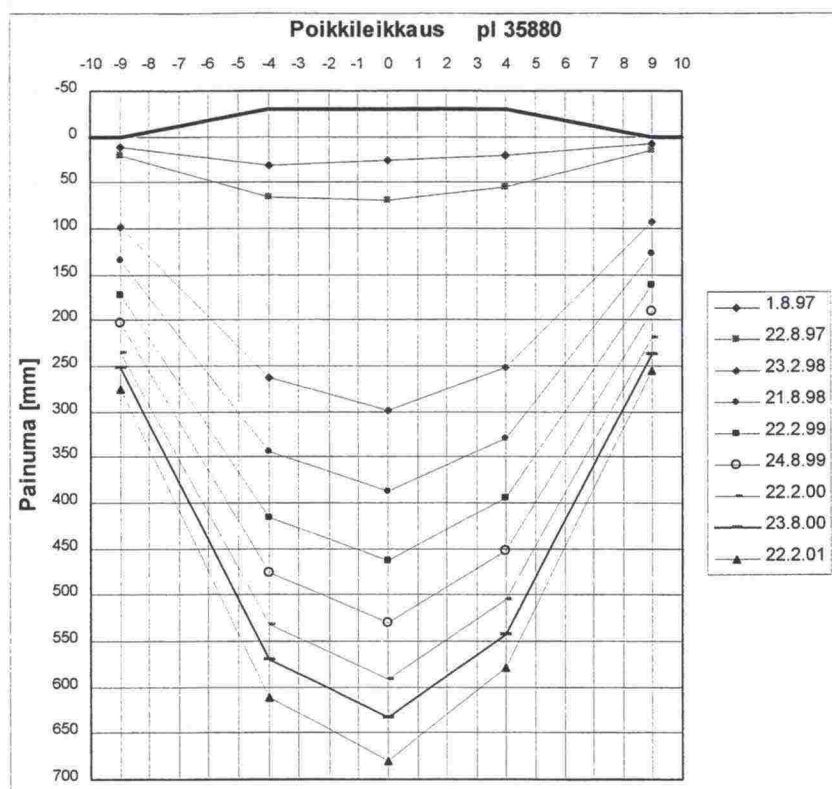
2. MITTAUSTULOSTEN ESITTELY

Koepenkereen mittaustulokset on esitetty täydellisenä sivuilla <http://www.tiehallinto.fi/pailas/pailas/htm>. Painumia, sivusiirtymiä ja huokosvedenpainetta on mitattu kolmen vuoden ajan ja mittausohjelmaa jatketaan edelleen.

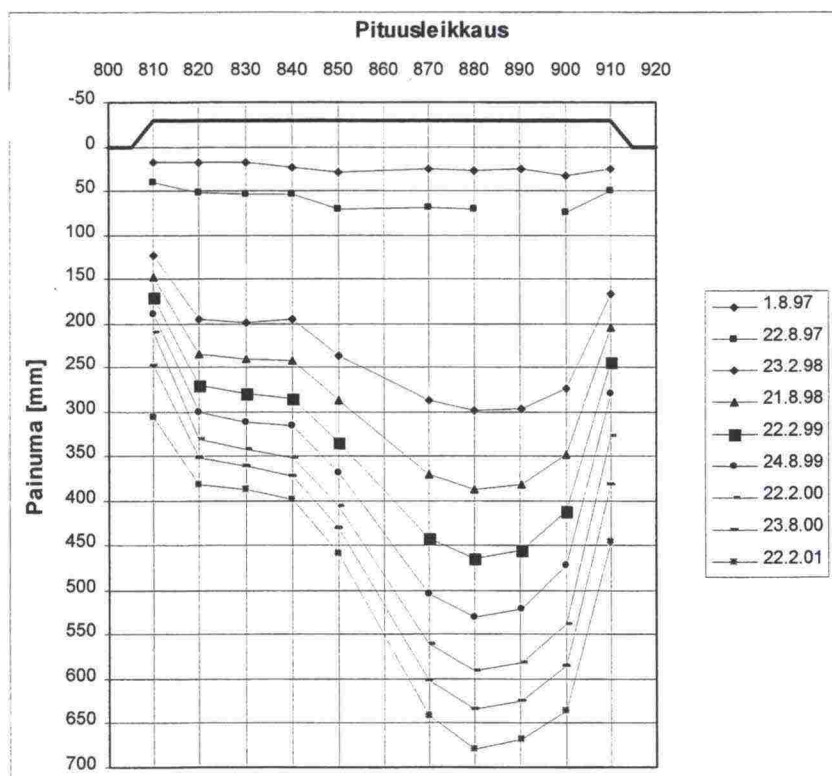
Kuvissa 4a – 4c on esitetty painumat maanvaraisessa (PL 35840) ja pysty-
ojitetussa (PL 35880) leikkauksessa. Kilpailu käsitti painumat 2 vuoteen asti. Tällöin maanvarainen pengeri oli painunut 31,6 cm ja pysty-
ojitettu 53,0 cm. Kuten aikapainumakuvaajista (kuvat 5a ja 5b) havaitaan, painuma jatkuu molemmissa osissa lähes tasaisella nopeudella, eikä primääripainuman loppuarvoa ole ilmeisesti saavutettu pysty-
ojitetulla osallakaan.



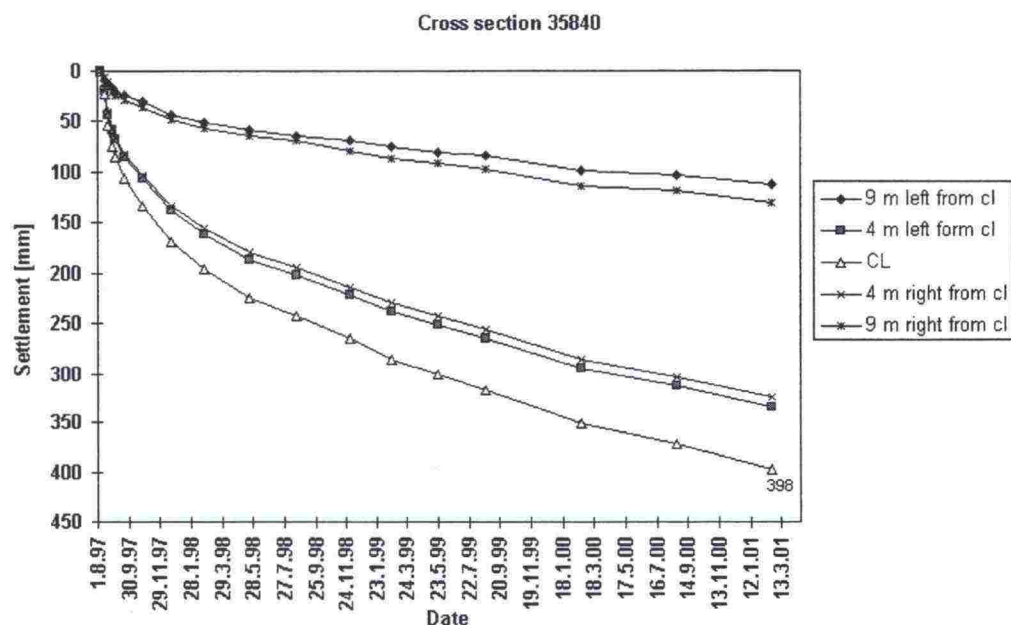
Kuva 4a. Haarajoen koepenger. Painumahavainnot. Maanvarainen pengeri.



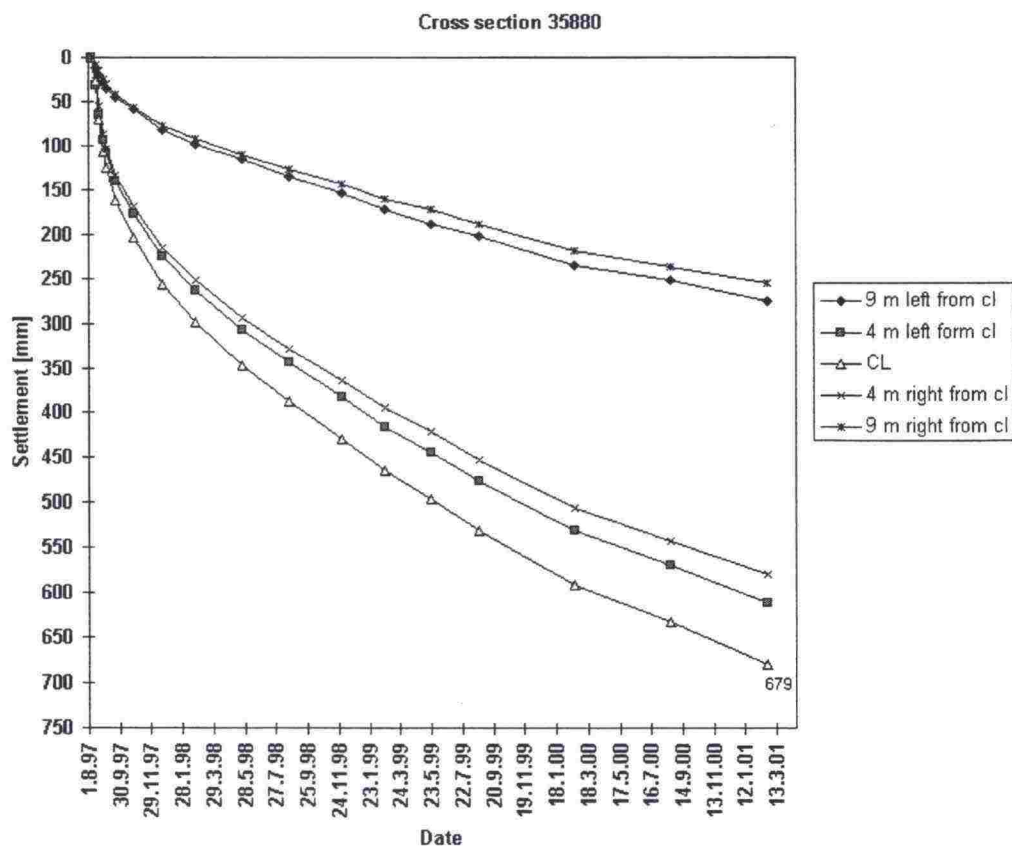
Kuva 4b. Haarajoen koepenger. Painumahavainnot. Pystyojitettu pohja.



Kuva 4c. Haarajoen koepenger. Painumahavainnot. Pituusleikkaus.

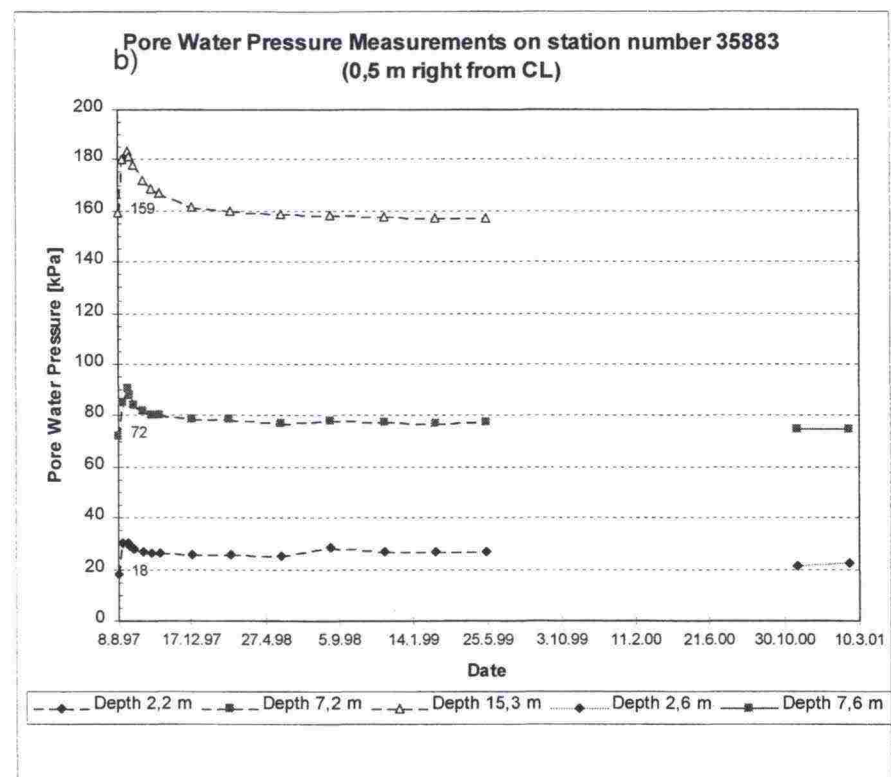
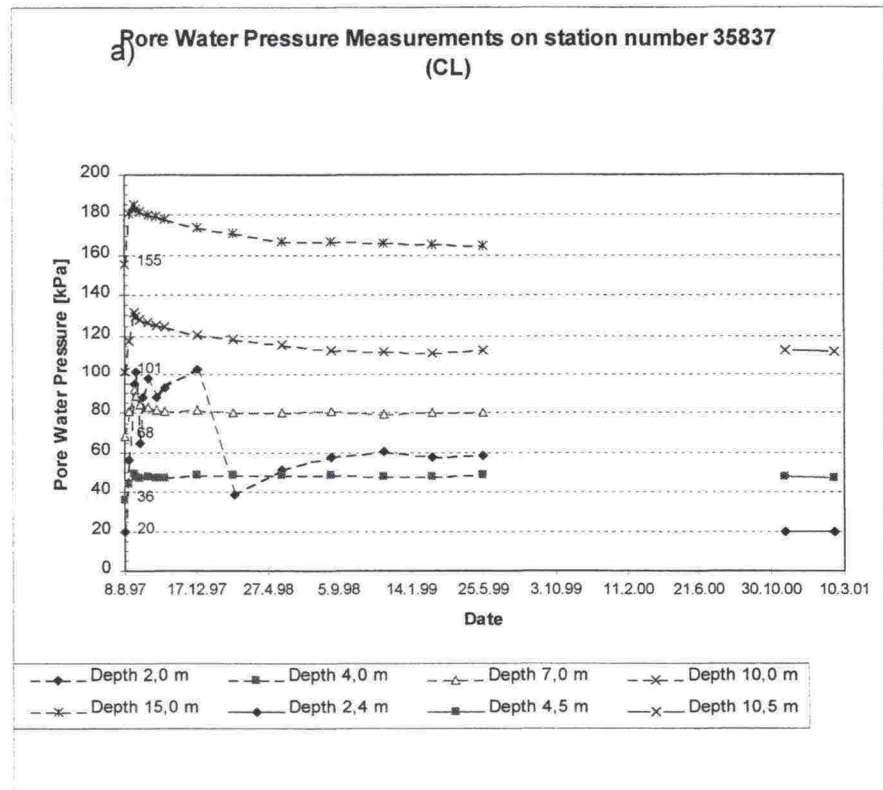


Kuva 5a. Haarajoen koepenger. Havaittu painumisnopeus. Maanvarainen penger.



Kuva 5b. Haarajoen koepenger. Havaittu painumisnopeus. Pystyojitettu penger.

Huokosvedenpaine ei missään mittauksessa ole kohonnut läheskään lisäkuormitusta vastaavaan arvoon rakennusaikana (kuva 6). Huokospaineet ovat kaikissa onnistuneissa mittauksissa laskeneet, mutta vielä kolmen vuoden päästä on painetaso selvästi lähtötilannetta ylempänä. Pysty-ojitetullakin osuudella huokosylipainetta on edelleen n. 10 kPa ja alenemisvauhti on hyvin hidasta.



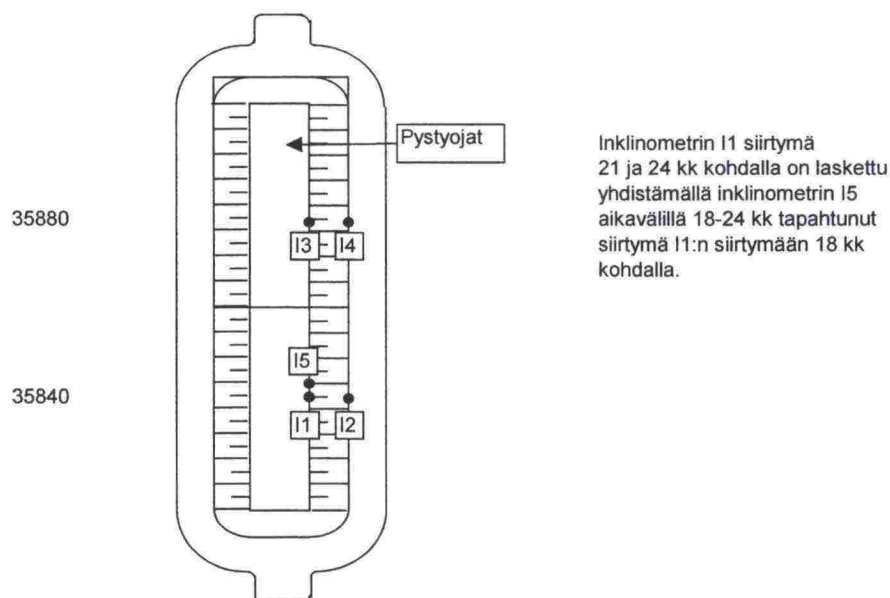
Kuva 6. Haarajoen koepenger. Havaittu huokosvedenpaine. a) Maanvarainen penger. b) Pystyöjitettu penger.

Suurimmat sivusiirtymät (40...70 mm /2 v) on mitattu n. kolmen metrin syvyydellä. Sivusiirtymien kehittyminen on esitetty kuvissa 7a – 7h. Kilpailutehtävää ei ilmeisesti onnistuttu asettamaan hyvin kun sivusiirtymiä pyydettiin laskemaan maanpinnan ja penkereen rajapinnasta. Onnistuneempaa olisi ilmeisesti ollut pyytää joko maksimiarvoa ja sen sijaintia tai kokonaista syvyysprofiilia. Sivusiirtymien ja siipikairalla mitatun leikkauslujuuden välinen riippuvaisuus on esitetty liitteessä 3.

Virhe. Tuntematon valitsimen argumentti.

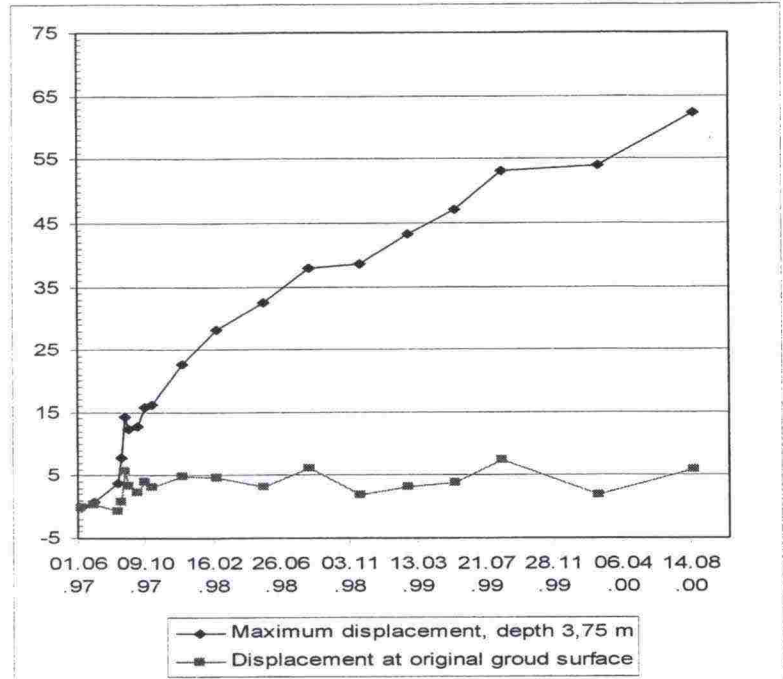
a)

b)

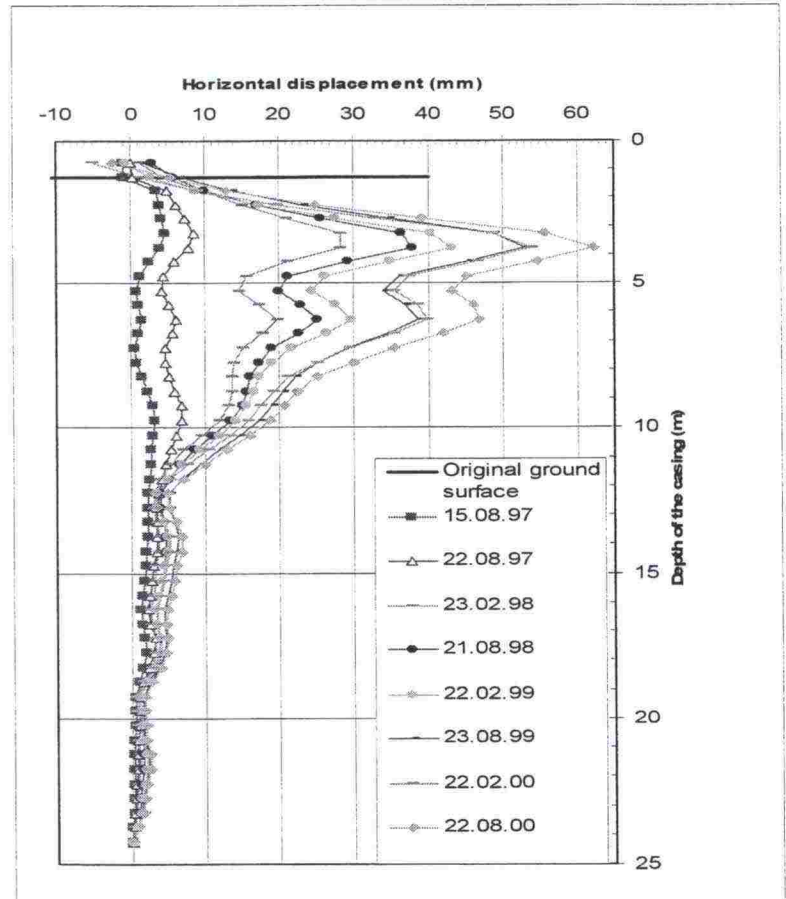


Kuva 7. Haarajoen koepenger. a) Havaittu sivusiirtymä penkereen ja maan rajapinnasta. b) Inklinometrien sijainti.

c)



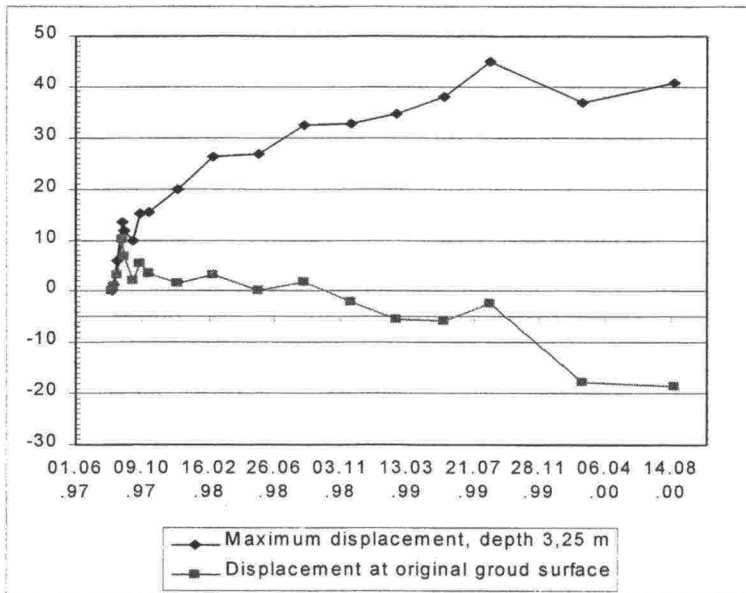
d)



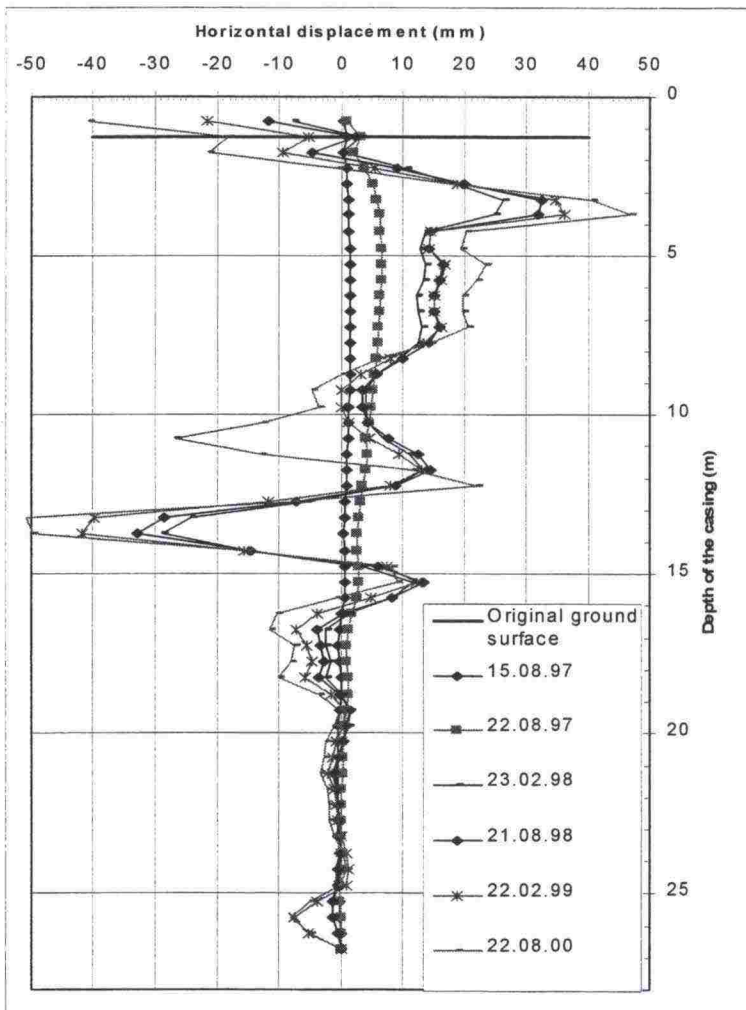
Kuva 7.

Haarajoen koepenger. c) Maanpinnan siirtymä ja maksimisiirtymä. d) Havaittu sivusiirtymä. Inklinometri I2. Maanvarainen pengeri.

e)



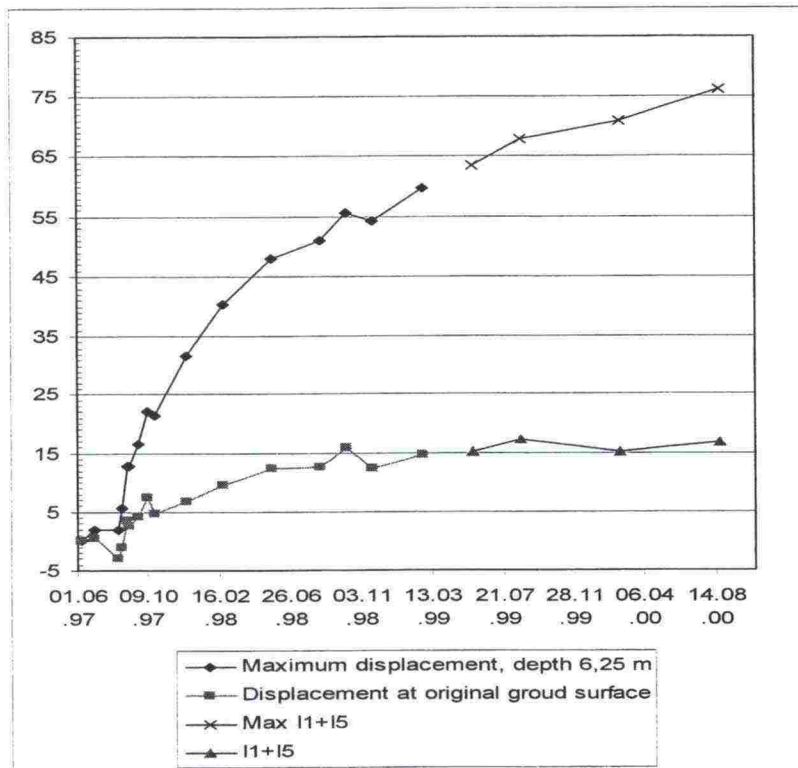
f)



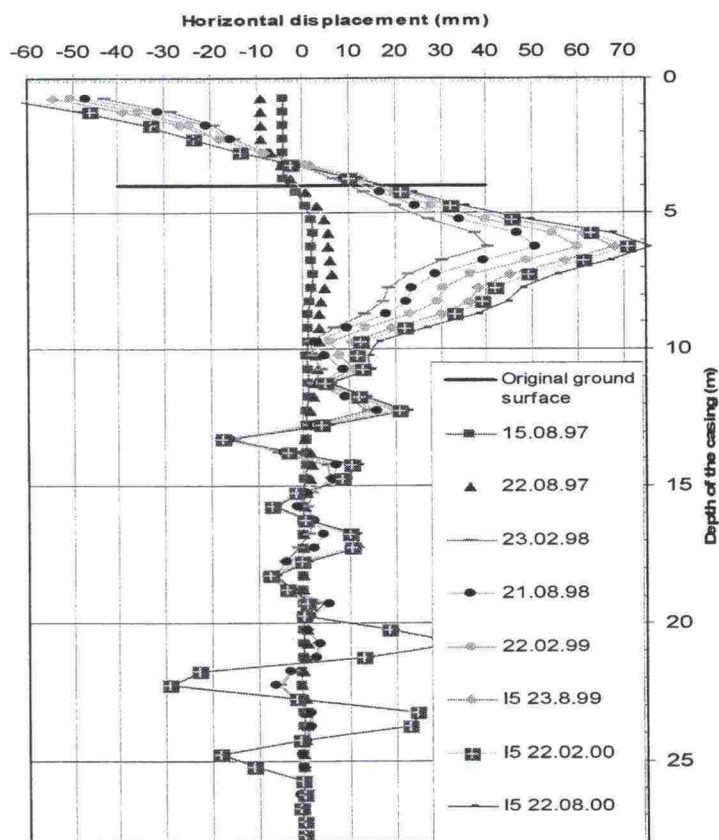
Kuva 7.

Haarajoen koepenger. e) Maanpinnan siirtymä ja maksimisiirtymä. f) Havaittu sivusiirtymä. Inklinometri I4. Pystyojitettu penger.

g)



h)



Kuva 7.

Haarajoen koepenger. g) Maanpinnan siirtymä ja maksimisiirtymä. h) Havaittu sivusiirtymä. Inklinoimetrit I1 ja I5. Maanvarainen penger.

3. MAANVARAINEN PENDER

3.1. Esitystapa

Ennen koepenkereen mittaustulosten valmistumista arvosteltiin kilpailijoiden tulosten esittämistapaa. Kilpailun eräänä tavoitteena oli saada malliesitys laskelmien esittämistavasta. Esitystapa on tärkeä, sillä laskelmien tarkistajan ja mahdollisesti jatkokäyttäjän on voitava helposti selvittää mihin laskelma perustuu (kokemusperäinen arvaus, vesipitoisuuteen perustuva menetelmä, tangenttimoduulimenetelmä, Janbun vai Terzaghin teoria, etc...) Samoin parametrien valinta ja niiden kelvollisuus tulisi olla tarkistettavissa.

Laskennan toistettavuuden kannalta olisi oleellista esittää koko laskenta-proseduuri alkujännityksistä alkaen painumisnopeuslaskelmaan asti jossakin pisteessä. Lyhyt tiivistetty yhteenveto varmistaisi sen, ettei jokaista numeroa jouduta selaamaan kansioista.

Tältä osin ei tavoite täytynyt, sillä suurin osa kilpailuvastauksista ei poikennut nykyisestä käytännössä olevasta esittämistavasta, joka on riemunkirjavaa. Osasta esityksiä ei selvinnyt laskennassa käytetty malli tai edes valmisohjelman nimeä. Useita vastauksia jouduttiin hylkäämään puutteellisten selitysten ja esitystavan sekä puuttuvien laskelmien perusteella.

Esitystapaa arvioitiin kokoamalla kaikista vastauksista yhteenvedot maanvaraisesta ja pystyöjitetusta penkereestä. Yhteenvedossa tutkittiin:

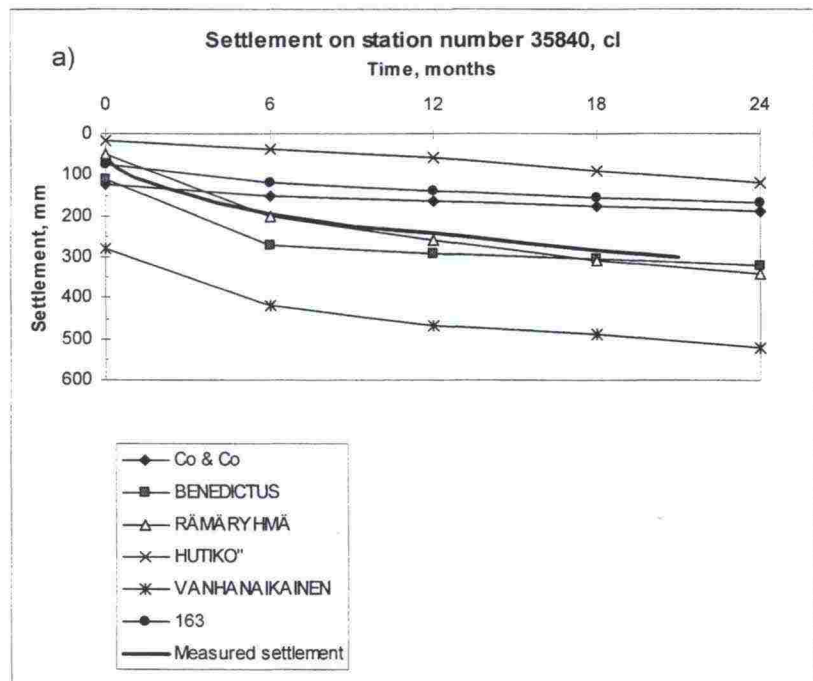
- laskentaohjelma, malli, teoria
- maakerrosten määrä
- painuvan kerroksen paksuus
- pohjaveden pinta
- suotoveden virtaussuunnat
- huokospainejakauma
- parametrien määrittäminen
- tulostustapa

Parhaissa kilpailuvastauksissa oli muutaman sivun mittainen looginen laskennan ja parametrien valinnan esitys sekä vaaditut tulosteet, usealla myös ohjelmasta helposti saatavia lisätulosteita. Ääripäässä taas oli koko

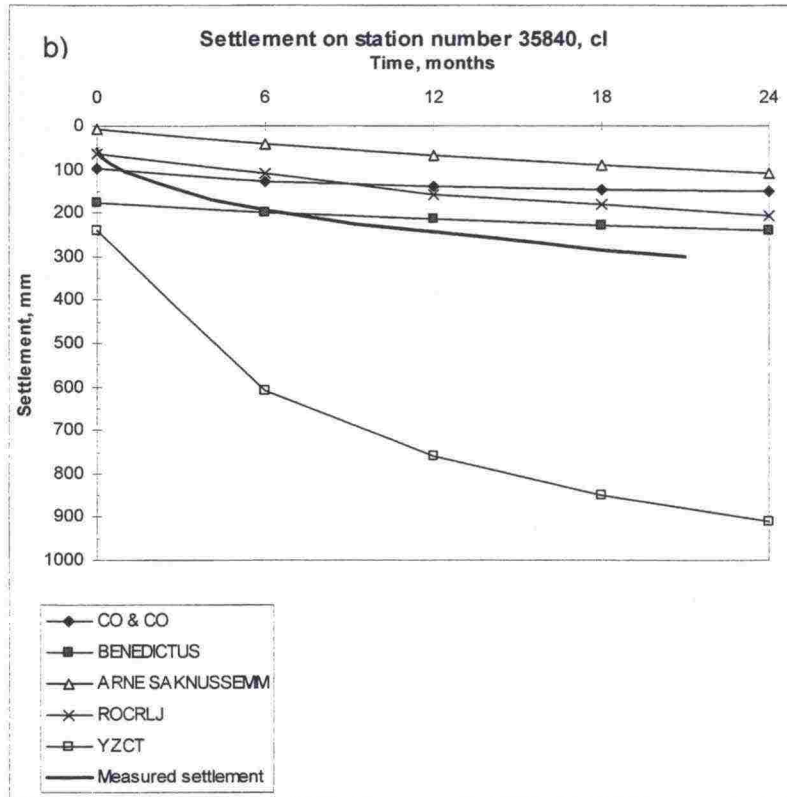
laskentatulokset laitettu nippuun ilman minkäänlaista selostetta. Laskentatulosten kommentointi oli verraten vähäistä. Tämä johtui ilmeisesti jo siihen mennessä tehdystä suuresta työstä ja toisaalta siitä, että tulostuskaavakkeet oli laadittu valmiiksi laskelmien helpompaa vertailua varten. Geoteknisten laskelmien esittämistapaa on käsitelty tielaitoksen julkaisussa (TIEL 218002 Geotekniset laskelmat 1996).

3.2. Laskentatulokset

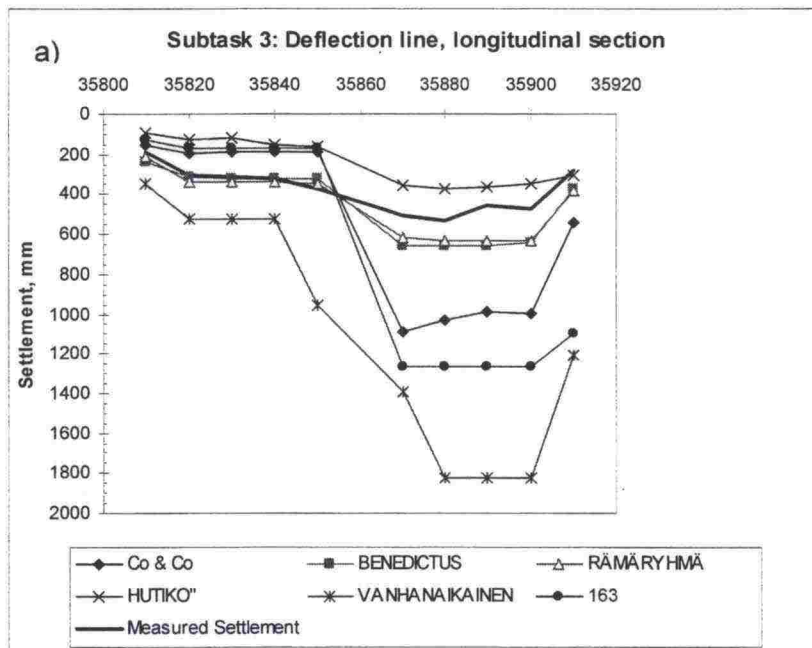
Hyväksytyjen kilpailuvastausten aikapainumakuvaajat on esitetty kuvissa 8a ja 8b sekä taipumaviivat keskilinjalla kuvissa 9a ja 9b. Maanvaraisen penkereen arvioidut 2 v painumat olivat 20...100 cm, kun mitattu tulos oli 31,6 cm. Teknillisessä korkeakoulussa tehtiin kesällä 1997 laskelmia useilla erilaisilla painumalaskentamenetelmillä maanvaraisen penkereen osalla (Saarelainen 1997, Näätänen et al 1977). Laskennat tehtiin käytettävissä olleiden ohjelmien ehdoilla valitsematta välttämättä parhaita parametrejä, eikä laskentaa tehdessä ollut vielä mittaustuloksia käytettävissä. Laskelmissa tehtiin vertailuja portaittaisten ja jatkuvapuristeisten ödometrikokeiden tulosten käytöstä sekä sekundaaripainuman mukaan ottamisesta. Erilaisilla menetelmillä ja ohjelmilla (KONSOL, EMBANKCO, PLAXIS, ZSoil, Sage-CRISP) saatiin 2 v painumaksi 17...33 cm. Kun laskelmat ulotettiin 30 vuoteen hajaantuivat tulokset pahasti (17...83 cm).



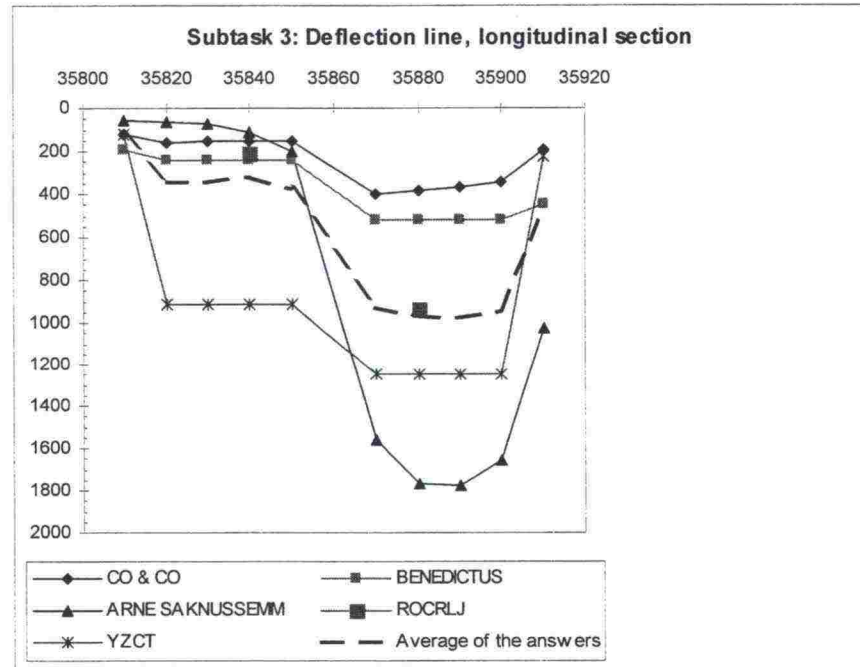
Kuva 8a. Haarajoen koepenger. Laskentatulosten vertailu. Maanvaraisen penkereen painumisnopeus. Kilpailuosa 1.



Kuva 8b. Haarajoen koepenger. Laskentatulosten vertailu. Maanvaraisen penkereen painumisnopeus. Kilpailuosa 3.



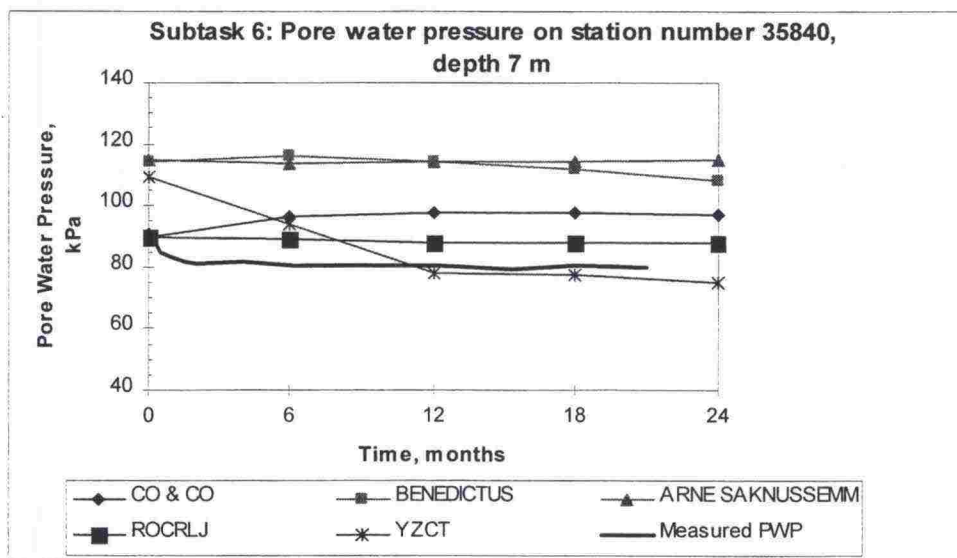
Kuva 9a. Haarajoen koepenger. Laskentatulosten vertailu. Kilpailuosa 1. Taipumaviiva keskilinjalla. 24 kk:n painuma.



Kuva 9b. Haarajoen koepenger. Laskentatulosten vertailu. Taipuma-
viiva keskilinjalla 24 kk:n painuma. Kilpailuosa 3.

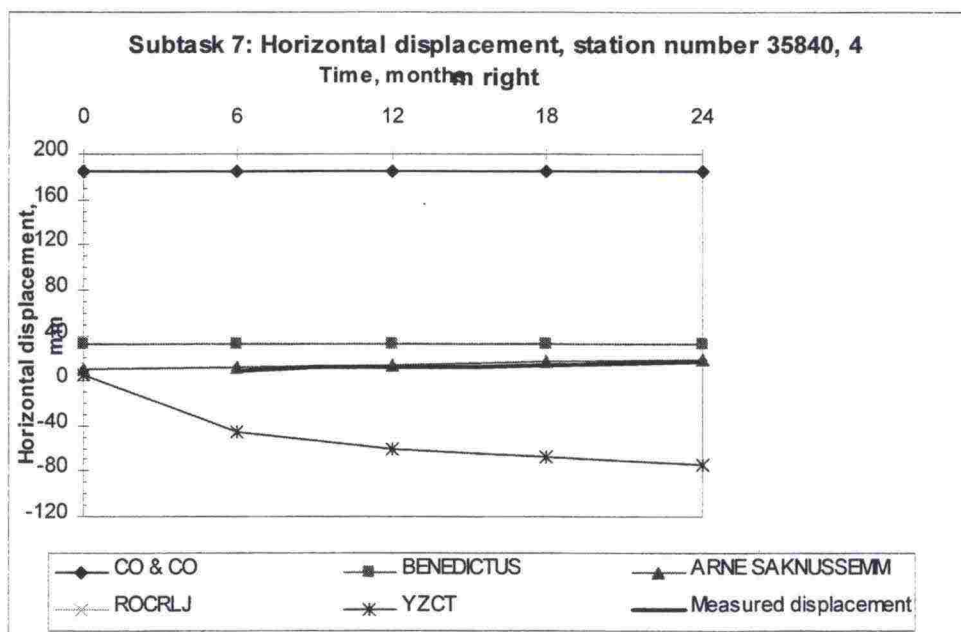
Loppukommenttina kuitenkin voidaan todeta, että oikein käytettynä kaikki käytetyt ohjelmat soveltuvat tavanomaisen maanvaraisen penkereen analysointiin. Myöhemmin (Aalto et al 1998, Näätänen et al 1998) on myös tutkittu mm. esikonsolidaatiopaineen valintaa ja antamistapaa sekä Poissonin luvun vaikutusta laskentatuloksiin. Ohjelmissa on havaittavissa suurta herkkyyttä vähäisiltä tuntuvien muutosten perusteella, joiden vaikutusta tulisi selvittää lisälaskelmien avulla.

Kuvassa 10 on esitetty kilpailijoiden huokospainearvioita 7 m syvyydeltä maanvaraisen penkereen alta. Tulokset poikkeavat rankasti (40 kPa) mitattuun arvoon verrattuna. Yhden laskijan (YZCT) tulos on 1 v alkaen lähes oikea (sama laskija sai 1 v painumaksi n. 100 cm). Huokosvedenpaineen oikea arviointi on selvästi ongelmallista varsinkin maapohjassa, joka on lievästi ylikonsolidoitunut ja jossa on useita erilaisia kerroksia. Huokospainelaskelma täytyisi tulevaisuudessa pystyä tarkentamaan varsinkin korjausrakentamiseen liittyen. Meneillään olevan konsolidaatio-prosessin kiinnisaaminen onnistuu ilmeisesti parhaiten huokospainemittausten ja laskelmien avulla.



Kuva 10. Haarajoen koepenger. Laskentatulosten vertailu. Kilpailuosa 3. Huokosvedenpaine. Maanvarainen pinger.

Sivusiirtymien (kuva 11) arvioinnissa tuloksissa on paljon hajontaa, jopa siirtymän suunta vaihtelee. Mittaustuloksissakin (kuva 7) on suurta vaihtelua.



Kuva 11. Haarajoen koepenger. Laskentatulosten vertailu. Kilpailuosa 3. Sivusiirtymä. Maanvarainen pinger.

3.3. Klassiset menetelmät

Laskentakilpailussa käytettiin painumien laskentaan tangenttimoduulimenetelmäksi kutsuttua menetelmää. Jännityslisäys on laskettu yleisimmin Boussinesqin menetelmällä, mutta myös 2:1 menetelmää oli käytetty. Useimmat laskijat olivat käyttäneet ilmeisesti Janbun konsolidaatioteoriaa, koska tulostuksissa oli esitetty muodonmuutos-syvyysjakaumia (esim. Mikko Smuran kehittämää Geomitoitus-ohjelmaa käytettäessä). Sekundaaripainumaa oli laskettu Buismanin menetelmällä (log t-S).

Taulukko 1. Laskentamenetelmät, ohjelmat ja parametrien valintatapa. Kilpailuosa 1.

Nimimerkki	Laskentamenetelmä ja ohjelma	Parametrien valinta
Co & Co	Alkupainuma Hooken lain avulla 3-ul. oma ohjelma, differenssimenetelmä, sekanttimoduulimenetelmä, Pystyojat Kjällmanin teorian avulla kerroksittain. Carrillon menetelmä.	$E_u=150 \cdot s_u$ Kerrosjako kaikkien koetulosten avulla. Painumaparametrit sekä sekundaaripainuman kerroin STD-ödometrikokeista. Konsolidaatiokerroin CRS-kokeista.
BENEDICTUS	Alkupainuma Leroueilin kokemuseräisellä menetelmällä Konsolidaatiopainuman suuruus MS-painu-ohjelmalla. Painumisnopeus omalla taulukkolaskentaohjelmalla, Terzaghin konsolidaatioteoria. 6 maakerrosta. Pystyjoitus Hansbon teorian avulla kerroksittain.	Kerrosrajat kairausten ja vesipitoisuuksien avulla. Painumaparametrit STD- ja CRS-kokeiden avulla. Valittu kerroksia edustavat kokeet. Parametrien arvoja korjattu kokemuseräisesti.
RÄMÄ-RYHMÄ	Geomitoitus/Smura+Omatekoinen EXCEL-ohjelma Janbun konsolidaatioteoria 4 kerrosta, vain 11,5m syvyyteen pohjavesi 2 m syvyydessä. Pystyjoitus Hansbon nomogrammin avulla.	Portaittaiset ödometrikokeet, edustavia keskiarvoja kerroksissa $c_h=1,6c_v$ STD-kokeiden perusteella
HUTIKO	Saarelman laskentaohjelma Terzaghin konsolidaatioteoria Kolme kerrosta, jotka jaettu kolmeen osaan. 1) Pystyjoituksen laskentaperusteita ei esitetty, kuitenkin $c_h \gg c_v$!	STD-ödometrikokeista edustavia keskiarvoja
VANHAN-AIKAINEN	Käsinlaskenta 3 maakerrosta Jännitysjakauma 2:1-menetelmällä Alkupainuma NGI-menetelmällä Tangenttimoduulimenetelmä Terzaghin konsolidaatioteoria. 2) Pystyjoitus. Vain maininta jonkin nomogrammin käytöstä.	CRS-kokeista valikoiden, NK
163	Geomitoitus/Smura Pystyjoitus Hansbon nomogramilla ja Geomitoitus-ohjelmalla.	$E_u=150 \dots 300 s_s$ STD-ödometrikokeista edustavia keskiarvoja. Pystyjoituksen konsolidaatiokerrointa muutettu vastaamaan Hansbon nomogrammin tulosta.

3.4. Numeeriset menetelmät

Valmiiden ohjelmien (PLAXIS, SageCRISP, FLAC, EMBANKCO, ABAQUS) lisäksi oli yksi vastaaja kehittänyt oman differenssimenetelmäohjelmansa, jossa "on käytetty entisestään tunnettuja laskentamenetelmiä hyväksi".

Taulukko 2. Haarajoen koepenger. Laskentamenetelmät, ohjelmat ja parametrien valintatapa. Kilpailuosa 3. Maanvarainen ja pystyöjitettu penger.

Nimimerkki	Laskentamenetelmä ja ohjelma	Parametrien valinta
Co&Co	Alkupainuma Hooken lain avulla 3-ul. oma ohjelma, differenssimenetelmä, sekanttimoduulimenetelmä, sivusiirtymät FLAC. Pystyöjat Kjällmanin teorian avulla kerroksittain. Carrillon menetelmä.	E_u 3-aks. kokeista Kerrosjako sama kuin 1. osassa. E_d , v ja huokospaineparametrit 3-aks.kokeista Konsolidaatiokerroin CRS-kokeista.
BENEDICTUS	SAGE-CRISP Modified Cam Clay Pystyöjitus: Geometrinen sovitus	Kerrosrajat kairausten ja vesipitoisuuksien avulla. Muodonmuutosparametrit ödometrikokeiden ja 3-aks. tulosten avulla.
ARNE SAKNUSSEMM	PLAXIS Pystyöjitettu alue mallinnettu erillisenä kerroksena sekä penkereen alla että vieressä. Pystyöjituksessa tehty sovitus pysty- ja vaakasuuntaisen vedenläpäisevyyden välillä.	Savikerrokset oletettu normaalkonsolidoituneiksi
ROCRLJ	Alkupainuma kokemusper. Tavenas (1979) mukaan ja SGI 13 mukaan. Painumalaskelmat EMBANCKO. Pystyöjitus Hansbo&Barron mukaisesti ohjelmalla CRS.	Kaikkia käytettävissä olevia luokit- ja painumakoetuloksia oli käytetty perusteellisesti hyväksi. 3-aks. kokeita oli tarkasteltu vain esijännityksen varmistamiseksi. Sekundaaripainuman kerroin kokemusperäisesti.
YZCT	ABAQUS 2-D. Modified Cam Clay. Elastic Visco-Plastic 1-D model (Yin&Graham).	STD-ödometrikokeet

3.5. Vertailua klassisten ja numeeristen menetelmien välillä

Kilpailuosan 1 voittanut laskija oli käyttänyt perinteistä tangenttimoduulimenetelmää (Geomitoitus-ohjelmalla) ottamalla huomioon ainoastaan 12 ylintä metriä. Laskennassa jo 10..12 m syvyydellä oleva kerros oli lähes kokoonpuristumaton. TKK:lla tehdyissä laskelmissa (kuten muissa kilpailuvastauksissakin) on kaikissa myös tämän kerroksen alapuolella oleva ylikonsolidoitunut kerros oletettu kokoonpuristuvaksi, sillä lisäjännitys on 12 m

syvyydellä vielä selvästi $> 50 \%$ tehokkaasta vallitsevasta jännityksestä (kuva 3).

Benedictus oli omalla ohjelmallaan onnistunut myös tavoittamaan aika-painumakuvaajan muodon ja oikean suuruusluokan painumille.

Numeeristen menetelmien käyttäjistä ei kukaan ollut löytänyt havaittua muotoa olevaa aika-painumakuvaajaa. Kaikki laskijat lukuun ottamatta YZCT:tä olivat jo 2 v painumissa selvästi havaittua pienemmissä arvoissa. Klassisten menetelmien käyttäjät tuntevat yleensä laskentamenetelmänsä ja osaavat arvioida kokemusta hyväksikäyttäen sopivat parametrit, eikä kovin helposti suuria erehdyksiä tapahdu. Numeeristen menetelmien käyttäjillä saattaa olla ollut ensimmäisiä käyttöyrityksiä tai jopa ohjelman testausta vastauksissaan. Numeerisia menetelmiä käyttäneillä useammalla ulkomaisella osanottajalla on saattanut olla vaikeuksia tunnistaa Haarajoen saven tavanomaisesta poikkeavaa käyttäytymistä. Esikonsolidaatiopaineen ylittymisen jälkeen tapahtuvan lähes romahdusmaisen painuman laskennassa saattaa helposti tapahtua suuriakin arviointivirheitä vähäisenkin esikonsolidaatiopaineen väärän valinnan takia.

TKK:lla tehdyissä jälkilaskelmissa on kuitenkin voitu havaita, että myös elementtimenetelmäohjelmilla voidaan saada kohtuullisen hyviä tuloksia, kunhan ohjelman erityispiirteet hallitaan ja laskentaan osataan valita oikeat parametrit. Tietenkään parametrien (esim. vedenläpäisevyyskertoimen) mielivaltaisen muuttelu ei ole luovallista. Meneillään olevilla laskelmissa ja tutkimuksilla pyritäänkin selvittämään, mistä mahdolliset erot johtuvat.

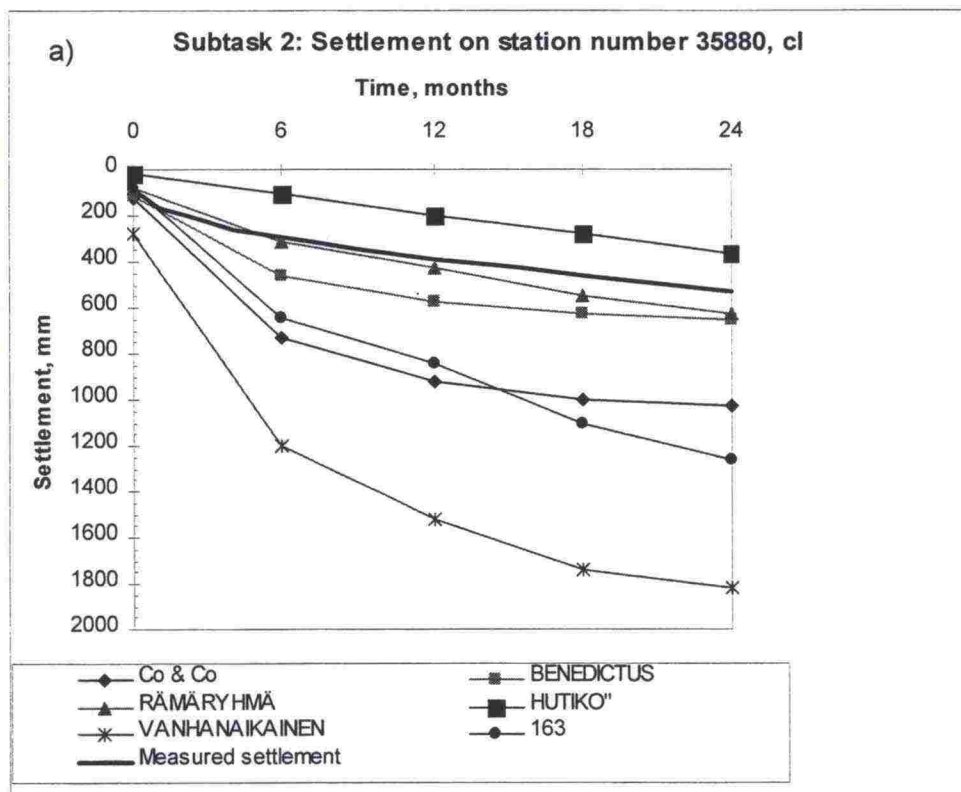
4. PYSTYOJITETTU PENDER

4.1. Esitystapa

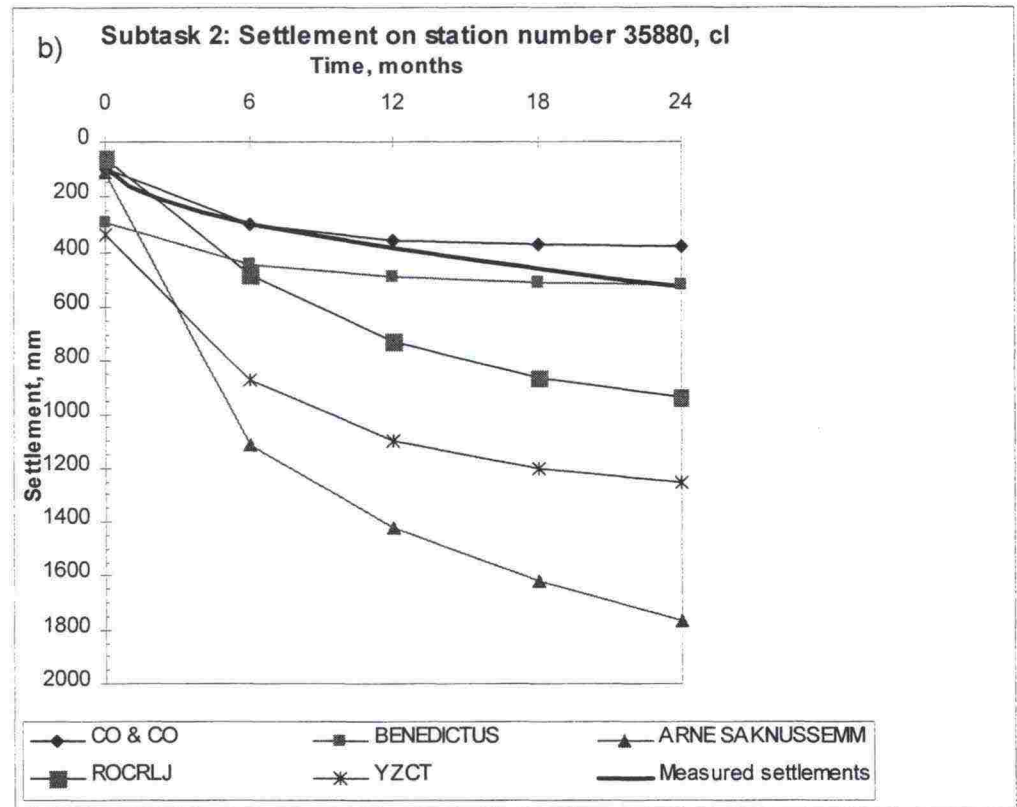
Pystyöjituslaskelmien esitystapa oli vieläkin vaatimattomampi kuin maanvaraisten penkereiden tulosten esitystapa. Menetelmien kuvaukset olivat lyhyitä, tai monissa oli vain mainittu "Hansbon nomogrammeilla" tms. Eräät kilpailijat eivät esittäneet mitään perusteita ratkaisuilleen.

4.2. Laskentatulokset

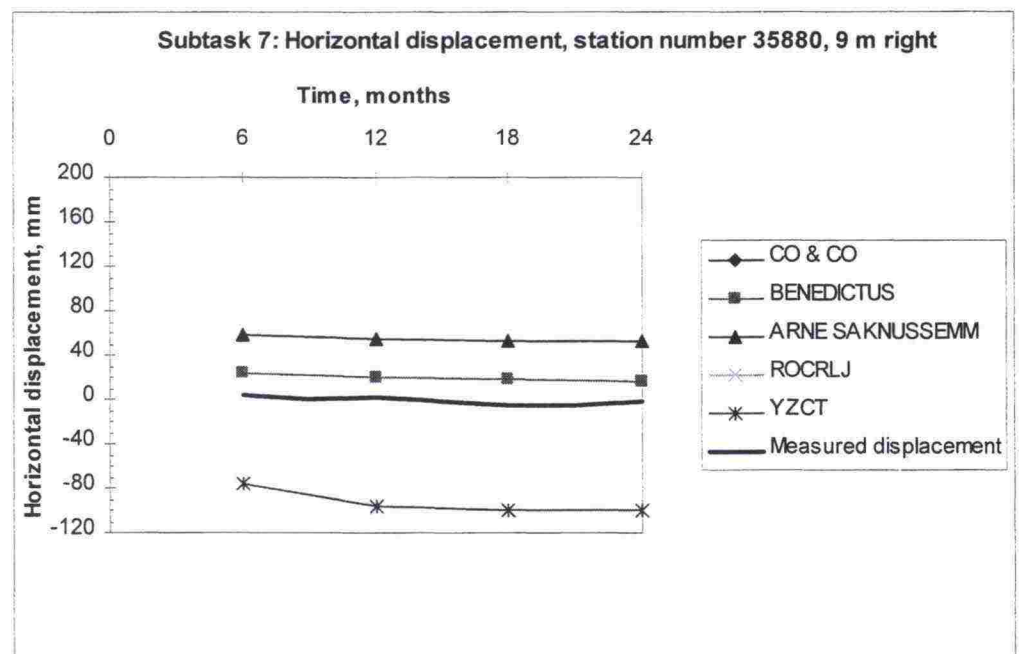
Hyväksytyjen kilpailuvastausten aika-painumakuvaajat on esitetty kuvissa 12a ja 12b, aika-siirtymäkuvaajat kuvassa 13 ja huokosvesipaineen kehittyminen kuvassa 14.



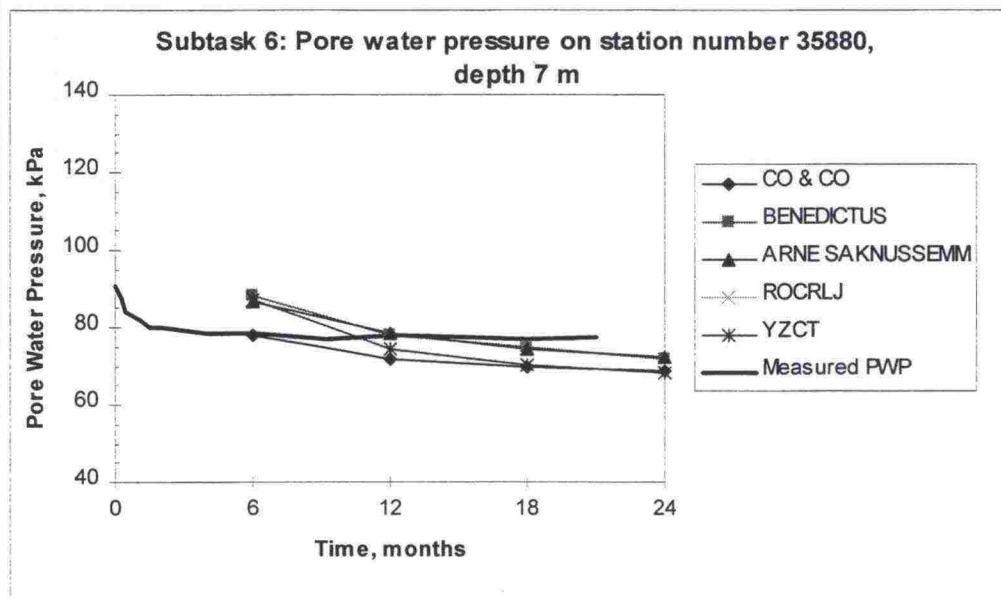
Kuva 12a. Haarajoen koepenger. Laskentatulosten vertailu. Pystyöjitetun penkereen painumisnopeus. Kilpailuosa 1.



Kuva 12b. Haarajoen koepenger. Laskentatulosten vertailu. Pystyöjitetun penkereen painumisnopeus. Kilpailuosa 3.



Kuva 13. Haarajoen koepenger. Laskentatulosten vertailu. Pystyöjitetun penkereen sivusiirtymät. Kilpailuosa 3.



Kuva 14. Haarajoen koepenger. Laskentatulosten vertailu. Pystyojitettu pinger. Huokosvedenpaine 7 m:n syvyydessä. Kilpailuosa 3.

Sekä kilpailuosan 1 että kilpailuosan 3 painumien laskentatuloksissa on valtava hajonta. Kun mitattu painuma oli 530 mm, kilpailuosan 1 tulosten vaihteluväli oli 363 – 1820 mm ja kilpailuosan 3 vaihteluväli 384 – 1765 mm. Jos taas tarkastellaan aika-painumakäyrän muotoa, kilpailuosan 1 voittaja oli tässä onnistunut melko hyvin. Merkille pantavaa on, että numeerisilla menetelmillä tehdyissä laskelmissa (kilpailuosa 3) ei aika-painumakäyrän muotoa osattu ennustaa.

Kilpailuosassa 3 ne kilpailijat, jotka olivat mallintaneet myös koepenkeren materiaalisesti elementtiverkolla, yliarvioivat jonkin verran sivusiirtymän kehittymistä (kuva 13). Yksi kilpailija, joka oli mallintanut penkereen maanpinnalla vaikuttavana jakautuneena kuormana, oli ennustanut jopa sivusiirtymien suunnan täydellisesti väärin. Ko. mallintamistapaa ei tulisikaan käyttää, jos halutaan laskea myös sivusiirtymiä.

Kaikki kilpailijat osasivat arvioida melko hyvin huokospaineen kehittymisen kilpailuosassa 3 (kuva 14). Jos tehtävänä olisi ollut ennustaa huokosylipaineen kehittyminen, joka korreloi paremmin painuman kehittymisen kanssa, tarkkuus olisi ollut ehkä toinen.

4.3. Klassiset menetelmät

Pystyojitetun penkereen aika-painumakäyttäytyminen on yleisimmin määritetty Kjellmanin ja Hansbon radiaalisen konsolidaatioteorian ratkaisuihin perustuen. Tällöin on useimmiten käytetty hyväksi Geotekniikan

informaatiojulkaisussa "Nauhapystyjoitus" (Tielaitoksen selvityksiä 42/1994) esitettyä, alunperin Hansbon laatimaa nomogrammia. Nomogrammissa lähtötietoina ovat pystyjojan vaikutusalueen halkaisija, mikä lasketaan pystyjojavälin avulla, haluttu laskenta-aika ja kerroksen vaakasuora konsolidaatiokerroin. Lisäksi nomogrammissa on sisäänsyötettyinä oletusarvoina tietoja pystyjojaan liittyvän häiriintyneen alueen halkaisijasta ja vedenläpäisevyydestä. Nomogrammista saadaan tulokseksi kerroksen radiaalinen konsolidaatioaste. Kilpailijat ovat kuitenkin käyttäneet nomogrammia siten, että koko painuvaa maapohjaa on kuvattu yhtenä kerroksena, jolle on joko arvioitu vaakasuora konsolidaatiokerroin tai pyritty laskemaan se kerrospaksuuksilla painotettuna keskiarvona. Yksi kilpailija (Benedictus) on lähtenyt liikkeelle Hansbon teorian ratkaisukaavoista ja laskenut aika-painumakäyttäytymisen kerroksittain. Co&Co on myös laskenut käyttäytymisen kerroksittain Kjellmanin teoriaan perustuen ja ottanut lisäksi huomioon samanaikaisen pystysuuntaisen konsolidaation Terzaghin yksisuuntaisen konsolidaatioteorian ratkaisun avulla käyttäen teorioiden yhdistämisessä Carrillon menetelmää (Nauhapystyjoitus 1994, Carrillo 1942).

Radiaaliseen konsolidaatioteoriaan perustuvia ratkaisuja tai nomogrammeja käytettäessä suurimpana ongelmana on ollut, että penkereestä aiheutuvien lisäjännitysten alue ulottuu sekä yli- että normaalikonsolidoituneille alueille, jolloin konsolidaatiokerroin muuttuu oleellisesti konsolidaatiojännityksen kohdalla. Tällaisissa tilanteissa aika-painumakäyttäytymistä ei pystytä laskemaan valmiiden ratkaisujen tai nomogrammien avulla vaan on siirryttävä numeerisiin konsolidaation differentiaaliyhtälön ratkaisumenetelmiin. Eräs kilpailija on väistänyt ongelmaa tekemällä arvion YK-osan painumisnopeudesta ja lisäämällä tuloksen NK-osan aika-painumakäyttäytymiseen.

Jotkut kilpailijat ovat arvioineet pystyjoitetun maapohjan painumaa radiaalisen konsolidaatioteorian perusteella ja muuttaneet konsolidaatiokerrointa suuremmaksi siten että radiaalisen teorian ja yksiulotteisen pystysuuntaisen konsolidaatioteorian tulokset ovat vastanneet toisiaan. Tällöin laskenta on voinut perustua pelkästään yksiulotteiseen Terzaghin tai Janbun teoriaan esim. Mikko Smuran ohjelmaa käyttäen. Tällaisesta vedenläpäisevyyssovituksesta (permeability matching) ei oltu esitetty kuitenkaan yksityiskohtia. Noin puolessa vastauksista on myös laskettu sekundaarisen konsolidaatiopainuman suuruus niin kuin pystyjoitetun maapohjan aika-painumakäyttäytymistä arvioitaessa tuleekin tehdä. Ratkaisu on poikkeuksetta perustunut Buismanin teoriaan (Nauhapystyjoitus 1994) siten että sekundaarinen painuma on alkanut kehittyä primaarisen konsolidaatiovaiheen lopussa.

4.4. Numeeriset menetelmät

Pystöjitetun alueen analysointitapa oli erilainen jokaisella kilpailuun hyväksytyllä vastaajalla, ja tästä syystä laskentaproseduuria tarkastellaan seuraavassa vastaajakohtaisesti.

Co&Co: Vastaaja käytti samaa laskentamenetelmää kuin kilpailuosassa 1. Huokosylipaineen dissipoituminen laskettiin omalla, differenssimenetelmään perustuvalla ohjelmalla, jolla ratkaistiin huokospaineen ja painuman muuttuminen ajan suhteen. Sekundaarinen konsolidaatio otettiin huomioon Buismanin menetelmällä. Sivusiirtymiä ei laskettu.

ROCRLJ: Radiaalinen konsolidaatio laskettiin Hansbon ja pystysuuntainen konsolidaatio Terzaghin teorialla. Konsolidaatioasteet yhdistettiin Carrillon menetelmällä. Vastaaja ei laskenut sekundaarisen konsolidaation vaikutusta eikä esittänyt huokospaineen ja sivusiirtymien muuttumista ajan mukana.

YZCT: 1. vaiheessa laskenta tehtiin ohjelmalla ABACUS siten että pystyoja-alue oli laskentapoikkileikkauksessa täysin avoimessa tilassa ja primaarista konsolidaatiota tapahtui vain pystyjoituksen ulkopuolella. Tuloksena saatiin pystyjoitusalueen primaarinen loppupainuma sekä pystyjojen alapuolella olevien kerrosten primaarinen konsolidaatiopainuma. 2. vaiheessa laskettiin pystyoja-alueen primaarinen konsolidaatioaste ja huokosylipaine ajan mukana Kjellmanin radiaalisen konsolidaatioteorian avulla. Pystyjoitusalueen painumien ja vaakasiirtymien kehittyminen saatiin kertomalla 1. vaiheen vastaavat tulokset primaarisella konsolidaatioasteella. Näin saatuihin painumiin ja siirtymiin lisättiin vielä viruman vaikutus: Viruma laskettiin yksiulotteisen Buismanin sekundaarisen konsolidaatioteorian avulla kuitenkin siten, että referenssiaikana käytettiin yhtä vuorokautta. Tulos korjattiin vastaamaan kaksiulotteista plane-strain-tapausta Skempton-Bjerrumin korjauskertoimen (Skempton et al 1957) avulla. Vaikka vastaukset tulivatkin kaikkiin tehtävänosiin, on esitetty laskentaproseduuuri erittäin työläs ja virhealtis. Lisäksi pinger mallinnettiin jakautuneena kuormana, josta aiheutui sivusiirtymien suuntautuminen penkereen keskiosaan päin.

Arne Saknussem: Tässä käytettiin ohjelmaa PLAXIS. Pinger mallinnettiin materiaalisesti penkereenä, mutta pystyjoitettu alue ulotettiin vaakasuunnassa koko laskentapoikkileikkauksen leveydelle. Pystyjoitusalueen pystysuuntaista vedenläpäisevyyttä muutettiin suuremmaksi sellaisen sovituksen avulla, jossa pystysuuntainen konsolidaatioaste Terzaghin teorialla vastaa likimain radiaalista konsolidaatioastetta Kjellmanin teorialla (vedenläpäisevyyssovitus pysty- ja vaakasuuntaisen vedenläpäisevyyden välillä). Vaakasuuntaiselle vedenläpäisevyydelle ei tehty sovituksia. Savikerrokset otaksuttiin normaalikonsolidoituneiksi, josta oli seurauksena suuria painumia.

Benedictus: Vastaaja käytti ohjelmaa Sage CRISP. Tässäkin pender mallinnettiin materiaalisesti penkereenä. Pystyjoitusalue ulottui pysty- ja vaakasuunnassa tehtävänannon mukaisesti. Pystyoja-alueelle tehtiin laskentapoikkileikkauksessa geometrinen sovitus (geometrical matching) radiaalisen ja plane-strain-tilan välillä, jolloin otettiin myös huomioon pystyjojen asennusvaiheen aiheuttama häiriintymisen vaikutus (Hird et al 1992). Näin pystyjojat voitiin mallintaa huokospainereunaehtoina, joiden keskinäinen etäisyys määritettiin em. geometrisen sovituksen avulla. Vedenläpäisevyyksiä eikä muitakaan materiaaliparametreja muutettu maanvaraiseen tilanteeseen verrattuna. Tuloksena saatiin painumat, siirtymät sekä huokospaine ajan mukana. Sekundaarisen konsolidaation vaikutus otettiin ilmeisesti huomioon kilpailuosan 1 laskentatulosten perusteella, mutta muuten laskentaproseduuri oli erinomainen ja suositeltava myös myöhemmin käytettäväksi.

4.5. Vertailu klassisten ja numeeristen menetelmien välillä

Primaarisen painuman laskenta perustui sekä klassisia että numeerisia menetelmiä käytettäessä radiaaliseen konsolidaatioteoriaan, jossa huokosvesi virtaa hitaasti pystyjoihin päin. Osa kilpailijoista oli lisäksi ottanut huomioon pystysuuntaisen konsolidaation maan pintaosissa sekä pystyjojen alapuolella. Laskentamenetelmissä oleellisin ero oli, että klassisia menetelmiä käytettäessä tarkasteltiin yleisimmin ns. yksikköselliä (yksittäisen pystyjojan ympäristöä radiaalisessa koordinaatistossa) ja siihen liittyviä klassisia Kjellmanin ja Hansbon ratkaisuja, kun taas numeerisia menetelmiä ja ohjelmia käytettäessä pyrittiin konsolidaatio-ongelma ratkaisemaan tasomuodonmuutostilassa erilaisia sovituksia käyttäen. Näistä käyttökelpoisimmaksi osoittautui geometrinen sovitus.

Painuma-arvioiden vaihteluväli oli kumpaakin menetelmää käytettäessä suuri: Kun kahden vuoden painumaksi penkereen keskellä oli mitattu 530 mm, klassisilla menetelmillä tehdyt kahden vuoden ennusteet olivat välillä 363 – 1820 mm ja numeerisilla menetelmillä 384 – 1765 mm. Kummallakin menetelmällä hyväksytyjen vastausten keskimääräinen kahden vuoden painuma-arvio oli noin 1.8-kertainen mitattuun verrattuna. Painumaennusteiden perusteella siis molemmat menetelmät olivat yhtä huonoja. Syy laskentatulosten suureen hajontaan liittyikin parametrien, erityisesti maakerrosten konsolidaatiojännityksen ja konsolidaatiokertoimen tai vedenläpäisevyyuskertoimen valintaan.

4.6. Hitaan painumisen syyt

Kolmen vuoden aikana maanvarainen pinger on painunut 37,2 cm ja pystyojitettu pinger 63,3 cm. Pystyojitettukaan pinger ei havaintojen perusteella näytä saavuttaneen läheskään primaaripainuman loppuvaihetta. Painuma jatkuu edelleen nopeasti. Koetulosten perusteella arvioitu sekundaaripainumakaan ei riitä selittämään painumisnopeutta, sillä mitatut sekundaaripainuman kertoimien arvot ovat suurimmillaan 1...2 % (suhteellinen kokoonpuristuma yhdellä logaritmisella aikasyklillä). Maapohjassa on edelleen havaittu huokosveden ylipainetta. Huokospainemittaukset keskeytyivät 2 v kohdalla ilmeisesti laitteiden rikkoutumiseen. Syksyllä 2000 on penkereen läpi asennettu 5 uutta huokospainemittaria, joten tulevaisuudessa päästään uudelleen selvittämään konsolidaatioastetta maapohjassa penkereen alla huokospainehavaintojen avulla.

Maapohjan sensitiivisyys kartiokokeiden perusteella on hyvin suuri (20...50), joten savikerros menettää häiriintyessään lujuutensa lähes kokonaan (häiritty leikkauslujuus on 0,5...1,0 kPa). Tämä saattaa aiheuttaa suurta eroa maapohjan aikapainumakäyttäytymisessä varsinkin pystyjojen välittömässä läheisyydessä (asennusvaiheen maapohjaa häiritsevän vaikutuksen ja siitä aiheutuvien painumisominaisuuksien muuttumisen takia). Savi-kerroksen vedenläpäisevyys ja erityisesti horisontaalinen konsolidaatio-kerroin pienenee merkittävästi häiriintyneessä vyöhykkeessä –varsinkin vaakasuuntaan.

5. KILPAILUTULOKSET JA PALKITTUJEN PUHEENVUORO

5.1. Kilpailutulokset

Painumalaskentakilpailun tulokset julkistettiin seminaarissa Helsingissä 25.10.1999.

Varsinaisen painumalaskentakilpailun palkintojärjestys on seuraavanlainen:

Kilpailuosa 1:

1. palkinto nimimerkille **Rämäryhmä**

Diplomi-insinööri Antti Junnila, Innogeo Oy
Diplomi-insinööri Harri Mäkelä, Innogeo Oy
Diplomi-insinööri Markku Aaltonen

2. palkinto nimimerkille **Benedictus**

Diplomi-insinööri Jaakko Heikkilä

3. palkinto nimimerkille **"Hutiko"**

Diplomi-insinööri Esa Juntunen, Geobotnia Oy

Kilpailuosa 3:

1. palkinto nimimerkille **Benedictus**

Diplomi-insinööri Jaakko Heikkilä

2. palkinto nimimerkille **Arne Saknussem**

Prof Frits van Tol, Delft University of Technology
Mr. Wout Broere, Delft University of Technology
Mr. Arjen Kort, Delft University of Technology

3. palkinto nimimerkille **YZCT**

Dr. Jian-Hua Yin, Hong Kong Polytechnic University
Prof. James Graham, University of Manitoba, Canada
Mr. Guofu Zhu, Hong Kong Polytechnic University

Tunnustuspalkinto ansiokkaista laskelmista kilpailuosassa 3 nimimerkille Co&Co

Diplomi-insinööri Osmo Korhonen, Helsingin kaupunki
Diplomi-insinööri Juha Korpi, Helsingin kaupunki

Tunnustuspalkinto ansiokkaista laskelmista kilpailuosassa 3 nimimerkille ROCRLJ

Mr. Rolf Larsson, Swedish Geotechnical Institute SGI
Ms. Christina Berglund, Swedish Geotechnical Institute SGI
Mr. Lars Johansson, Swedish Geotechnical Institute SGI

Kilpailuosan 2 (ensimmäisen vaiheen parhaat laskelmat) voittivat nimimerkillä Co&Co DI Osmo Korhonen ja DI Juha Korpi Helsingin kaupungin geotekniseltä osastolta. Palkintolautakunta arvio vastausta seuraavasti: "Tekijä osoittaa hallitsevansa erinomaisesti painumalaskennan. Käytetyt teoriat ja niissä käytetyt parametrit on selkeästi esitelty ja perusteltu. Vastaus poikkeaa edukseen rutiinilaskelmista."

Kilpailuosan 4 (toisen vaiheen parhaat laskelmat) voitti nimimerkki Arne Saknussem. Ryhmään kuuluvat prof. Frits van Tol, Wout Broere ja Arjen Kort Delftiin teknillisestä korkeakoulusta. Palkintolautakunnan arvostelussa vastauksesta todettiin: "Raportti on erittäin hyvin laadittu. Käytetyt laskentamenetelmät käyvät hyvin ilmi vastauksesta ja käytetyistä malleista on esitetty lyhyt kuvaus. Kerrosjako ja parametrien valinta on esitelty perusteluineen."

5.2. Palkittujen puheenvuoro

Antti Junnila, INNOGEO OY

Painumalaskelmista

Painumalaskentakilpailun suoritusvaiheesta on vierähtänyt kolme ja puoli vuotta ja tulosten julkistamisestakin jo melkein vuosi. Kilpailu, siihen osallistuminen ja tulosten seuraaminen ovat antaneet lisävirikkeitä tiettyjen asioiden pohtimiselle. Palkintojenjakotilaisuudessa pitämässäni esitelmässä käsittelin painumakriteerien määrittämistä sekä laskelmien käyttöä yhtenä, mutta tärkeänä lenkkinä geoteknisen ongelman ratkaisuun johtavassa ketjussa. Ajatuksena oli nimenomaan, että pitää kussakin tapauksessa ennen laskemista selvittää itselleen, mitä lasketaan ja mitä tarkoitusta varten.

Selvitä siis itsellesi, mitä lasket ja mitä varten. Kun ajatellaan käytyä painumalaskentakilpailua, asetelma oli mitä kirkkain, sillä tavoitteena oli yksinkertaisesti laskea painumat mahdollisimman oikein. Laskelmien lähtötiedoiksi oli tehty harvinaisen perusteelliset pohjatutkimukset, jotka tarvitsi "vain" osata tulkita. Laskelman tuloksesta eivät riippuneet mitkään kilpailuryhmän ulkopuoliset taloudelliset intressit ja palkinnonsaannin kannalta oli samanarvoista erehtyä alas kuin ylös päinkin. Tulosten perusteella ei tarvinnut osata tehdä johtopäätöksiä mistään muusta asiasta, jonka riippuvuussuhde painumalaskelmiin olisi pitänyt ymmärtää. Kilpailuvastausten hajonta oli näissäkin oloissa yllättävän suuri.

Mitä mahtaa tapahtua laskentatulosten vaihtelulle ja ennen kaikkea niistä tehtävien johtopäätösten vaihtelulle, kun siirrytään kirkkaista kilpailuolosuhteista harmaitakin sävyjä sisältävään käytännön elämään?

Vaikuttavatko toimeksiantajan ja yhteistyökumppanien odotukset tuloksiin? Vaikuttaako tuloksiin suunnittelijan mahdollinen tottumus lähtötietojen ja välitulosten ylivarmoihin pyöristykseen? Lasketaanko vääriä asioita tajuamatta, mikä missäkin tapauksessa olisi olennaisinta? Harrastetaanko asioiden todistamista tyyliin: "Nämä laskelmat osoittavat, että valitun ratkaisun painumat ovat alle 200 mm, joten ratkaisu on hyvä"? Mikä oli todistettava, vai tulikohan todistetuksi?

Jaakko Heikkilä, Arcus Oy

Haarajoen koepenkereen laskenta FEM:llä

Yleistä

Tässä tekstissä on tarkoitus kuvata kohteen laskentaa ja tuoda esille joitain yleisiä huomioita FEM-laskennasta penkereen muodonmuutosten ja stabiliteetin laskennassa. Yksityiskohtiin ei mennä johtuen siitä, että laskennasta on jo aikaa, eivätkä kaikki laskennalliset yksityiskohdat ole enää tuoreessa muistissani.

Laskennassa käytetty malli

Alla on esitetty ylhäältä alaspäin käytetyt materiaalmallit ja parametrit. Sekä pystyjojitetulle että ojittamattomalle osalle käytettiin samoja maakerroksia.

Taulukko 3

Kerros	Materiaalimalli	E [kN/m ²]	u	c [kN/m ²]	f	g [kN/m ³]	k_x [m/s]	k_y [m/s]	
Penger	Epp, Mohr Coulomb	20000	.28	5	35	21			

Kerros	Materiaalimalli	E_h [kN/m ²]	E_v [kN/m ²]	u_{hh}	u_{vv}	G_{hv}	g [kN/m ³]	k_x [m/s]	k_y [m/s]
Kuiva-kuori	elastic	3500	3500	0.2	0.2	1500	17.3	1.15E-9	1.16E-9

Kerros	Materiaalimalli	kappa	Lamda	e_{cs}	M	u	g [kN/m ³]	k_x [m/s]	k_y [m/s]
Savi 1	mcc	0.03	2.2	9.3	1.1	0.2	14.3	1.06E-9	5.29E-10
Savi 2	mcc	0.03	2.8	9.3	1.4	0.3	14.7	3.37E-10	2.88E-10
Savi 3	mcc	0.04	1.9	7.4	1.0	0.2	15	3.84E-10	2.22E-10
Savi 4	mcc	0.05	1.6	7	1.1	0.3	15.5	3.84E-10	2.22E-10
Savi 5	mcc	0.03	1.7	9	1	0.25	16	7.93E-10	3.96E-10

Kerros	Materiaalimalli	E_h [kN/m ²]	E_v [kN/m ²]	u_{hh}	u_{vv}	G_{hv}	g [kN/m ³]	k_x [m/s]	k_y [m/s]
Moreeni	elastic	50000	50000	.3	.3	30000	20	2.58E-5	2.58E-5

Laskennassa käytettiin SAGE-CRISP ohjelmaa, joka on maamekaniikkaan tarkoitettu 2-D ohjelma. Materiaalimallina savikerrosten osalla oli modified cam clay. Elementteinä käytettiin 8-solmuisia suorakaide elementtejä. Penger mallinnettiin avoimena ja muut kerrokset konsolidaatio-elementein.

Huokospainereunaehtoina käytettiin ojittamattoman penkereen osalla seuraavaa:

- luonnollisella maanpinnalla $u_{exc} = 0$
- moreenikerroksen sivuilla $u_{exc} = 0$

Eli moreenissa vedenpaineen poistuminen tapahtuu vaakasuunnassa.

Koska käytetty malli on taso, mallintuvat pystyojat "seinämäisinä". Ekvivalentti ojaväli laskettiin Russel, Hird ja Pyram:n esittämällä tavalla, huomioiden ojien asennuksen aiheuttama häiriintyminen "smear". Itse ojien mallinnuksessa on vaihtoehtoina käyttää elementtejä oja mallintamaan tai mallintaa ojat huokospaine ehdolla. Aikaisemman kokemuksen perusteella saavutetaan elementtien käytöllä hyvin pieni hyöty, tästä johtuen käytettiin seuraavaa huokospaine ehtoa:

Ojien kohdilla $u_{exc} = 0$

Penkereen materiaaliparametreissa käytettiin pientä koheesiota laskennan nopeuttamiseksi. Penkereen jäykkyytenä on käytetty varsin alhaista arvoa, osittain edellisestä syystä ja osittain muodonmuutosten aiheuttaman löyhtymisen takia (liikenne ei aiheuta jatkuvaa tiivistystä).

Kuivakuoren osalla on käytetty kimmoista mallia. Maanpinnassa käytetäänkin usein yksinkertaisia kimmoisia tai kimmoplastisia malleja, koska kriittiseen tilaan perustuvilla malleilla päädytään helposti laskennallisiin vaikeuksiin. Erityisesti tämä koskee normaalikonsolidoituneita maita.

Laskelmien kritiikkiä

Mitattujen tulosten perusteella on havaittavissa, että lasketut pengerrysvaiheen painumat ovat liian suuret sekä, että konsolidaatiovaiheen painuma on liian hidas. Lisäksi näyttää pystyojitetun osan havaintojen perusteella ilmeiseltä, että kokonaispainuma on laskettu liian pieneksi. Huokosvedenpaineen osalta on havaittavissa yliarviointia, joka korreloi hitaan konsolidaation kanssa. Samoin on jännityspolkujen perusteella havaittavissa, ettei myötöpinnan sisällä tapahdu merkittävää konsolidaatiota.

Syitä laskentatulosten ja havaintojen ristiriitaan en ole laskemalla tutkinut. Ilmeiseltä kuitenkin näyttää, että mm. seuraavilla tekijöillä saattaa olla vaikutusta:

Liian suuri pengerrysvaiheen painuma:

Käytetyssä mallissa ei voida muuttaa jäykkyyttä kuvaavia parametreja myötöpinnan sisällä, vaikka jäykkyys todellisuudessa on epälineaarinen. Konsolidaatiopainuman kasvattaminen (huokospaineen pienentäminen) myötöpinnan sisällä lisää painumia, mutta havaintojen perusteella tätä kuitenkin tapahtuu. Ilmeisesti kannattaa kokeilla jäykkyyden kasvattamista ja vedenläpäisevyyden lisäämistä myötöpinnan sisällä.

Liian hidas konsolidaatiopainuma:

Kerroksellisuudesta johtuen vaakasuuntainen vedenläpäisevyys lienee käytettyä suurempi ja suuremman k_x :n käyttö lienee perusteltua.

Etenkin ojittamattomalla osalla muodostui n. 4-7 m syvyyteen "epäilyttävän" korkea huokospaine. Tämä saattaa johtua valitusta elementti jaosta.

Liian pieni kokonaispainuma:

Normaalikonsolidoituneella alueella kerrosten keskimääräinen jäykkyys lienee valittua pienempi. Syynä saattaa olla myös liian suureksi arvioitu ylikonsolidaatio.

Myös sekundääripainuman luonteinen ilmiö saattaa olla syynä laskettua suurempaan kokonaispainumaan.

Parannuksia FEM-laskentaan

Nykyisin käytössä olevissa ohjelmissa on kimmoisen alueen mallintamiseen paremmin sopivia malleja. SAGE-CRISP v4:ssä on lisätty mm. seuraavat materiaalmallit:

- Duncan and Chang
- Mohr-Coulomb elastic-plastic hardening
- 3 surface kinematic hardening

Näistä kaksi ensimmäistä soveltuvat.

Kohteen kritiikkiä

Valitulla paikalla on maaperä voimakkaasti kerroksellista. Esimerkiksi pl 35880+40 otetuissa näytteissä, vesipitoisuus vaihtelee pintaosissa (0-5 m)

0.5 m matkalla enimmillään välillä n. 75-115 % ja syvemmillä paikoin 0.5 m matkalla muutos on n. 10 –15 %. Myös muodonmuutosominaisuudet vaihtelivat vesipitoisuuden mukaan.

Tästä johtuen käytettävät kerrosparemetrit piti valita siten, että ne kuvasivat kerroksen keskimääräisiä ominaisuuksia. Laskentakilpailun kannalta tämä oli mielenkiintoinen tehtävä. Mitattujen muodonmuutosten syiden jälkikäteisen tarkan selvittämisen kannalta tämä kuitenkin tuottanee vaikeuksia.

Laboratoriokokeet FEM-laskennassa

Kokeita valittaessa on hyvä olla selvillä käytettävä laskentamalli. Kun käytetään modified cam clay mallia voidaan tavanomaisten tutkimusten lisäksi pitää suositeltavina minimeinä seuraavaa:

- jännityspolkuohjattu K_0 -konsolidointikoe
- 3 kpl isotrooppisesti konsolidoituja suljettuja 3-akselikokeita
- ödometrikoe

Mikäli halutaan parantaa tutkimusten laatua on suositeltavaa tehdä yksi avoin 3-akselikoe. Lisäksi voidaan kaikkien 3-akselikokeiden tarkkuutta parantaa tekemällä konsolidointi anisotrooppisena K_0 -konsolidointina.

Kuivakuoren leikkausmoduulin mittaukseen on käytetty 3-akselikoetta, jossa on vaakasuuntaisen muodonmuutoksen suora mittaus. Tämä johtuu tilavuuden muodonmuutoksen mittauksen epävarmuudesta

FEM-laskennasta saatava hyöty

Painumien kannalta voidaan yleisenä hyötynä mainita eri painumavaiheiden "automaattinen" huomiointi. Klassisella laskennalla tämä vaatii laskennan jakamista osiin. Pengerrysvaihe jakaantuu kahteen osaan: konsolidaatio-painuma yli-konsolidoituneella alueella, missä u_{exc} on pieni sekä normaali-konsolidoituneeseen alueeseen, jolla ollaan käytännössä suljetussa tilassa. Pengerryksen jälkeen alkaa kolmantena vaiheena normaali konsolidaatio-painuma.

Toinen yleinen hyöty on huokospaineen ja konsolidaatiotilan huomioiminen kerroksittain. Erityisesti keskimääräiseen c_v :n arvoon perustuvat klassiset menetelmät saattavat johtaa harhaan. Korostuneesti tämä tulee esille, kun maakerrosten c_v ja s'_c vaihtelevat kerroksittain.

Mikäli maanpinta on suhteellisen tasainen ja penkereen stabiileetti yli 1.5 ei FEM:llä yleensä päästä huolella suoritettuja klassisia laskelmia tarkempaan lopputulokseen painumissa. Sen sijaan kun stabiileetti on huono ja/tai

maaston geometria vaihteleva (esim. alikulkujen kohdat), saavutetaan FEM-laskelmista hyötyä.

Toinen kohde ovat erittäin pehmeät ja yleensä nuoret savet. Näillä tavataan paikoin (esim. Vapaavaraston ja Arabianrannat) suurehkoja kitkakulman ja pieniä lepopaineen arvoja. Tällöin ei useinkaan klassisilla laskelmilla päästä "järkeviin" tuloksiin, vaan stabiliteettia yliarvioidaan. FEM:llä voidaan alkujännitystila huomioda oikeammin ja päästään parametrien mitatuilla arvoilla "järkeviin" tuloksiin.

Juha Korpi ja Osmo Korhonen, Helsingin kaupunki

KOKEMUKSIA TIELAITOKSEN JÄRJESTÄMÄSTÄ PAINUMALASKENTAKILPAILUSTA

Näin jälkikäteen on hyvä ottaa opiksi saaduista kokemuksista. Aivan ensin kiitämme kilpailun järjestäjiä korkealuokkaisesta – ja haastavasta – kansainvälisestä kisasta. Kilpailumateriaalia oli yllin kyllin. Osaa lähtötietomateriaalista ei millään ehtinyt analysoida, vaan laskijat todennäköisesti – kuten me – joutuivat karsimaan osan lähtötiedoista ja käyttämään itselleen sopivimpia ja tutuimpia laskennan lähtötietoja.

Kun kilpailu julkistettiin, oli ensimmäisenä ajatuksena vastikään Juha Korven johdolla laaditun painumalaskentaohjelmiston testaus "tositilanteessa". Ohjelmassa voidaan käyttää perinteisiä epälineaarisia sekä lineaarisia muodonmuutosmalleja. Kilpailun 1-osa perustui perinteisiin sekä jatkuvakuormitteisiin ödometrikokeisiin. Aineiston laajuuden takia käytimme ainoastaan standardikokeisiin perustuvia tuloksia joitakin poikkeuksia lukuun ottamatta. Tehtävä oli selkeä.

Kilpailun 2-vaiheessa aineiston laajuus hieman yllätti. Vanha sanonta "kyllähän sitä aina painumia laskee mutta kun ei ole parametrejä" ei pitänyt tässä tapauksessa lainkaan paikkaansa. Ja ilmeisesti tässä vaiheessa jyvät alkoivat erottua akanoista. Oleellistahan oli, että kilpailussa testataan sekä parametrien määrittäytaitoa, laskentamenetelmää ja laskentaohjelmia; asioita, joista geotekninen suunnittelija on vastuussa. Kilpailussahan haluttiin vastauksia vain perinteisiin ongelmiin: painuma, huokospaine ja sivusiirtymä. Tuloksissa oli tietysti hajontaa, mutta että näinkin paljon!

Pieni kritiikki: Kilpailun säännöt (lue: niiden tulkinta) paljastuivat vasta kesken kilpailun.

Jatkossa on erityisen arvokasta, jos laskennan kohteena oleva penger saisi olla rauhassa ja käynnistettyjä seurantamittauksia jatkettaisiin pitkälle tulevaisuuteen. Näin edistetään tuloksia analysoimalla geoteknisen tietämyksen tasoa Suomessa. Kun tuloksista on "revitty" kaikki hyöty irti, on uuden kisan aika.

Kilpailun merkitys mitataan tulevaisuudessa. Sanomattakin on selvää, että kilpailu on omiaan nostamaan suomalaisen geoteknisen osaamisen tasoa ja lisäämään suomalaista geo-mainetta myös ulkomailla. Voitto tuli kotiin!

6. JATKOTUTKIMUKSET

Painumalaskentakilpailu päättyi v. 1999, mutta koepenkereen mittauksia on edelleen jatkettu. Koepenger rakennetaan valmiiksi osaksi meluvallia, mutta muutokset ovat niin vähäisiä, että havaintoja kannattaa edelleen tehdä ja jatkaa koepenkereen jälkilaskelmia.

Koepenkereen aiheuttamista muutoksista maapohjan esikuormituksessa ja leikkauslujuudessa on jo tehty jatkotutkimuksia syksyn 2000 aikana. Penkereen läpi tehdyillä kairauksilla ja näytteenotolla sekä laboratoriokokeilla pyritään selvittämään tarkasti, kuinka suuri osa jännityslisäyksestä on jo siirtynyt tehokkaan jännityksen lisäykseksi ja kuinka paljon ko. kuormitus on lisännyt maakerroksen suljettua leikkauslujuutta. Raportti jatkotutkimuksista valmistuu v. 2001.

Pystyöjen toimivuutta on jo selvitetty, ja VTT:n tutkimuksissa on selvinnyt, että ojien toimintakyvyssä ei ole havaittu mitään vikaa. Selvityksissä ei ole saatu mitään selvyyttä työtekniikan mahdollisesta maakerrosta häiritsevästä vaikutuksesta. Pystyöjen ankkuroitumista maahan epäiltiin hitaan painumisen syyksi, mutta mitään täsmällistä havaintoa tällaisesta ei ole tehty.

Kilpailussa havaittiin selvästi arkuutta käyttää moderneja laskentamenetelmiä – ehkäpä suurta lisätyömäärää pelättiin – sekä myös laskentatulosten suuri hajonta samoista lähtötiedoista huolimatta. Lisää kokemusta laskentamenetelmistä erilaisissa pohjasuhteissa sekä myös erilaisilla rakenteilla (mm. kaivannot) tarvitaan. Laskentamenetelmien kalibrointi edellyttää, että tuloksia voidaan verrata mitattuihin tuloksiin. Tästä johtuen Tielaitoksessa ja TKK:lla on käynnistetty olemassa olevien koepenkereiden jatkotutkimuksia uusien koepenkereiden rakentamiseen.

Laskentaohjelmien käyttöä pyritään myös lisäämään kurssien avulla. TKK:lla järjestettiin elokuussa 2000 Computational Geotechnics-kurssi, jossa harjoiteltiin PLAXIS-ohjelman käyttöä. Vastaavanlaisten jatkokurssien ja käyttäjäkokousten avulla voitaisiin edelleen lisätä ohjelmien käyttövarmuutta.

Yhteyksillä kansainvälisten ohjelmien kehittäjiin (PLAXIS; SageCRISP) voidaan jonkin verran vaikuttaa ohjelmissa oleviin malleihin ja näiden parametrien hyväksyttäviin arvoihin. Näissä yhteyksissä voidaan helposti saada myös kansainvälistä yhteistyötä, varsinkin jos käytettävissä on Haarajoen koepenkereen tyyppisiä, hyvin tutkittuja ja instrumentoituja koerakenteita.

Pystyöjituksen analysointi epäonnistui lähes kaikilta laskijoilta. Syynä lienee se seikka, että pystyöjitettu osa koepenkereestä painuu edelleen nopeasti, eikä mittaustuloksista voida päätellä primääripainuman vieläköän päättyneen

3 vuoden jälkeen. Toisaalta myös laskentaohjelmat ovat keskeneräisiä, eikä esim. riittävän hyviä sekundaaripainuman laskentamalleja ole kehitetty eikä yksinkertaisempiakaan ohjelmoitu. Pystyöjien asennustekniikkaa ja asennustyön laadunvalvontaa tulisi kehittää. Saven häiriintymisen vaikutusta pystyöjien toiminnassa tulisi selvittää. TKK:lla v. 2000 alkaneessa EU-projektissa (SCMEP) on mukana myös tätä aihetta sivuavaa tutkimusta (destruction). Tutkimuksia tehdään tällä hetkellä sekä Glasgowissa että Otaniemessä. Näiden tutkimusten tuloksien soveltamismahdollisuuksia pystyöjituksen (ja myös syvästabiloinnin) mallinnuksessa tulisi selvittää.

7. KILPAILUSTA SAADUT KOKEMUKSET

Koepenkereen suunnittelu ja toteutus sujui erittäin hyvin.

Instrumentointi ja mittausohjelma oli onnistunut. Eri syvyyksillä mitattuja painumia ei ilmeisesti ollut tarpeeksi.

Huokosvedenpainemittauksien aloittaminen riittävän aikaisin on välttämätöntä.

Pengermateriaalin ja kovien ylikonsolidoituneiden kerrosten ominaisuuksilla on laskennassa merkitystä.

Laboratoriotulosten käsittelytavan tulee olla sellainen, että laskija voi helposti määrittää niistä oman ohjelmansa ja mallinsa vaatimia parametreja. Tätä asiaa on näiden kokemusten perusteella jo kovasti muutettu ja kehitetty. Parempi tuntuma "uusiin parametreihin", joita varsinkin numeerisissa menetelmissä tarvitaan, on saatava.

Perinteisistä parametreista tärkein on esikonsolidaatiopaine (tai paremmin ylikonsolidoitumisaste OCR), jonka määrittämisvarmuutta on edelleen kehitettävä.

Konsolidaatiokertoimen määrittäminen ja valinta laskentaohjelmiin vaatii täsmentämistä. Perinteinen ohje on ollut se, että konsolidaatiokertoimen arvo määritetään kahdelta esikonsolidaatiopainetta seuraavalta kuormitusportaalta. Tämä ohje on järkevä vain normaalisti konsolidoituneilla savilla, joilla ennen koetta voidaan laskea vallitseva tehokas jännitys ja valita kuormitusportaat siten, että yksi kuormitusporras osuu esikonsolidaatiopaineen kohdalle. Tämän jälkeen laskijan on helppo valita sopiva arvo laskelmiinsa toteutuvan jännityslisäyksen perusteella. Ylikonsolidoituneissa savissa yleensä epäonnistutaan esikonsolidaatiopaineen ylittävän portaan konsolidaatiokertoimen määrittämisessä. Parempana menetelmänä saattaisi tulla kyseeseen menettely, jossa lasketaan tai määritetään konsolidaatiokertoimen sijasta vedenläpäisevyyskerroin ja selvitetään sen pieneneminen muodonmuutoksen kasvaessa. Tämän jälkeen lasketaan konsolidaatiokertoimen arvo vedenläpäisevyyden ja todellista konsolidaatiotilaa vastaavan muodonmuutosmoduulin avulla. Konsolidaatiokertoimen tai vedenläpäisevyyskerroimen kokemusperäiseen suurentamiseen esim. kertomalla havainto arvolla 2...10 on suhtauduttava erittäin varovaisesti. Todennäköisemmin syy arvioitua hitaampaan painumaan on väärä laskentamalli tai virhe kuivatusolosuhteissa tms kuin parametrin määritysvirhe.

Painumaparametrien, varsinkin tangenttimoduulin parametrien käyttö muulla kuin sillä jännitysalueella, miltä ne on määritetty, aiheuttaa helposti virheitä. Asiasta on Tielaitoksella valmistunut erinomainen raportti (44/2000

Painumalaskentamenetelmien käyttökelpoisuuden arviointi). Nämä virheet ovat helposti hyvin suuria, varsinkin CRS-kokeen yhteydessä, mikäli vain esikonsolidaatiopainetta on redusoitu.

Painumalaskentakilpailun laskelmista sekä myös mittaustuloksista havaittiin, että pystyöjitetun penkereen käyttäytymistä ei ollenkaan hallita. Laskentamenetelmät poikkesivat kaikki toisistaan, joten vakiintunutta ja luotettavaa menetelmää ei ole olemassa. Mittaustulosten analysointikin on ongelmallista, sillä pystyöjitettu penger painuu edelleen 3 v:n jälkeen ikään kuin primäärinen konsolidaatio ei olisi vielä kukaan loppumassa.

Vesipitoisuutta ja vesipitoisuuden avulla tehtävää painumalaskelmaa oli tässäkin kilpailussa käytetty paljon hyväksi. Alkuperäinen malli, jossa oletetaan maapohja normaalikonsolidoituneeksi, ei kuitenkaan sovellu Haarajoen koepenkereelle. 1 vuoden havaintojen jälkeen TKK:lla tehdyissä vesipitoisuuteen pohjautuvissa laskelmissa [Saarelainen 1998] saatiin laskelmat onnistumaan kohtuullisen hyvin. Laskentaohjelmassa oli tällöin käytetty ao kohteen vesipitoisuuden ja painumaparametrien välistä riippuvaisuutta sekä siipikairauksen avulla arvioitua esikonsolidaatiopainetta.

8. YHTEENVETO

Haarajoen koepenkereen painumalaskentakilpailuun osallistui yhteensä n. 15 vastaajaa, joista kolme oli ulkomaalaista. Kilpailutehtävän ensimmäinen vaihe vastasi tavanomaisessa geoteknisessä suunnittelussa käytettävissä olevilla tuloksilla tehtäviä painumalaskelmia. Maastossa tehtyjä kairauksia ja laboratoriossa tehtyjä luokituskokeita ja ödometrikokeita oli kuitenkin käytettävissä moninkertaisesti tavanomaiseen verrattuna. Koepenkereen kohdalla pohjasuhteet ovat hankalat ja maapohjan ylikonsolidoituminen aiheutti selvästi suurta hajontaa laskentatuloksiin, kuten myös vaikeuksia jälkilaskentoihin. Tältä osin kilpailu on erittäin onnistunut, ja tulosten suuri hajonta kuvaa geoteknisten laskelmien vaikeutta – oikeaa ratkaisua ei ole olemassa, vain hyviä ennusteita voidaan tehdä. Ensimmäisen kilpailuvaiheen toisena tehtävänä oli myös tulosten ja laskentamenetelmien esittämisen selkeys ja johdonmukaisuus. Tähän osa-alueeseen odotettiin kilpailuvastauksista valmista mallitulostusta. Kuitenkin vain pari tekijää oli jollakin lailla panostanut laskentamenetelmänsä täsmälliseen selvittämiseen ja tulosten esitystavan viimeistelyyn ei ollut panostanut kukaan. Useimmilla laskijoilla on ollut valmisohjelmia käytössään, ja osassa näistä tulosten jälkikäsitteily vaatisi jonkin verran lisätyötä. Varsinkin elementtimenetelmien tulostustapa helposti karkaa käsistä ja tulosteet paisuvat lukemiskelvottomiksi.

Kilpailun toisen vaiheen laskentatehtävä oli suuritöinen ja kilpailuun olivat vakavissaan lähteneetkin vain todella aiheeseen paneutuneet laskijat. Käytettävissä olleet ohjelmat olivat etupäässä käyttökelpoisia kilpailutehtävien analysointiin – varsinkin maanvaraisella penkereellä, mutta kaikkiin menetelmiin liittyy vaikeuksia parametrien oikeiden arvojen määrittämisessä. Kuitenkaan lisätietoja tai yksityiskohtaisempia koetuloksia, esim. kolmiakselikoetuloksia, ei pyydetty. Koetulosten suuri määrä saattoi hämätä luulemaan etukäteistulkintojen olleen oikeita ja lopullisia. Tulosten tarkastelun ja jälkilaskentojen jälkeen on helposti havaittavissa, että koetuloksia olisi jokaisen laskijan kannattanut tulkita itsenäisesti. Varsinkin niissä kerroksissa, joissa penkereen aiheuttama lisäkuormitus maapohjassa oli hyvin lähellä maakerroksen esikonsolidaatiopainetta, olisi tulosten omalla tulkinnalla saatu tarkempia tuloksia.

Klassisilla menetelmillä saatiin kohtuullisen onnistuneita painumaennusteita ilmeisesti siitä johtuen, että laskijat tunsivat entuudestaan käyttämänsä laskentamenetelmän sekä myös hankaliksi osoittautuneiden pohjasuhteiden merkityksen. Toisaalta myös tehtävä ykkösvaiheessa klassisilla menetelmillä oli yksinkertaisempi kuin kakkosvaihe, jossa piti arvioida myös sivusiirtymää ja huokosvedenpainetta.

KIRJALLISUUS

Carrillo, N., Simple two- and three-dimensional cases in the theory of consolidation of soils. J. Math. & Phys., 21, 1942.

Geotekniset laskelmat. TIEL 2180002, 1996.

Hird, C.C., Pyrah, I.C., Russell, D., Finite element modelling of vertical drains beneath embankments on soft ground, Geotechnique 42, No. 3, 1992.

Korhonen, O., Korpi, J., Lojander, M., Estimation of Final Settlement Based on In Situ measurements. NGM-2000. XIII Nordiska Geoteknikermötet Helsinki 5.-7.Juni 2000. Finnish Geotechnical Society r.y. Helsinki 2000.

Länsivaara, Tim, Painumalaskentamenetelmien käyttökelpoisuuden arviointi. Tielaitoksen selvityksiä 44/2000. Helsinki 2000. 48s.

Nauhapystyöjitus. Geotekniikan informaatiojulkaisuja. Tielaitoksen selvityksiä 42/1994. Helsinki 1994. TIEL 3200251.

Saarelainen, K., Settlement Calculations of the Haarajoki Test Embankment. 12th European Young Geotechnical Engineer's Conference. EYGEC. Tallinn 1998.

Skempton, A.W., Bjerrum, L., A contribution to the settlement analysis of foundations on clay. Geotechnique 7, No. 3, 1957.

Tielaitos. Haarajoen koepenkereen painumalaskentakilpailu. Kilpailuohjelma. 3.3.1997

LUETTELO HAARAJOEN KOEPENGERTÄ KOSKEVISTA ARTIKKELEISTA JA ESITELMISTÄ

Aalto, A., Rekonen, R., Lojander, M., The Calculations on Haarajoki Test Embankment with the Finite Element Program PLAXIS v. 6.31. Application of Numerical Methods to Geotechnical Problems. Proc. of the 4th European Conference on Numerical Methods in Geotechnical Engineering NUMGE98. Udine, October 14-16, 1998.

Cahyano, M.F., Numerical Modelling of Vertically Drained Soil. Work for Master of Science, Dept. of Civil Engineering, University of Glasgow, Sept. 1998.

Näätänen, A., Puumalainen, N., Saarelainen, K., Aalto, A., Lojander, M., Vepsäläinen, P., Estimation of the settlement of the Haarajoki Test Embankment. Proceedings of the 6th Finnish Mechanics Days, Sept. 5-6. 1997, Oulu.

Näätänen, A., Finite Element Calculations on Haarajoki Test Embankment. A seminar given at Glasgow University, Nov. 26th, 1997.

Näätänen, A., Vepsäläinen, P., Lojander, M., Finite element Calculations on Haarajoki Test Embankment. Application of Numerical Methods to Geotechnical Problems. Proc. of the 4th European Conference on Numerical Methods in Geotechnical Engineering NUMGE98. Udine, October 14-16, 1998.

Näätänen, A., Numeeristen laskentamenetelmien opetus ja käyttö geoteknisessä suunnittelussa. GEOFOOR N:o 18. 10.5.2000. Suomen Geoteknillinen Yhdistys r.y.

Näätänen, A., Lojander, M., Modelling of the Anisotropy of Finnish Clays. VII Suomen Mekaniikapäivät. Tampere 25-26.5.2000. NIDE 2. Tampereen Teknillinen korkeakoulu. Tampere 2000.

Pietikäinen, E., Smura, M., Competition to calculate settlements at Haarajoki test embankment. NGM-2000. XIII Nordiska Geoteknikermötet Helsinki 5.-7. Juni 2000. Finnish Geotechnical Society r.y. Helsinki 2000.

Ravaska, O., Vepsäläinen, P., On the stress dependence of consolidation parameters. Proc. XV Int. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ICSMGE), Istanbul 27.-31.8.2001. (Submitted to be published).

Saarelainen, K., Aika-painumalaskelmien parametrien määrittäminen ja verifiointi. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu, rakennus- ja yhdyskuntatekniikan osasto, Espoo 1997. 149s.

Tielaitos, Geotekniset laskelmat. Geotekniikka ja geologia. Geokeskus. Helsinki 1996.

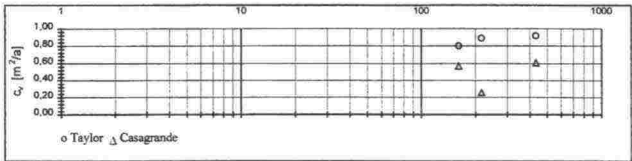
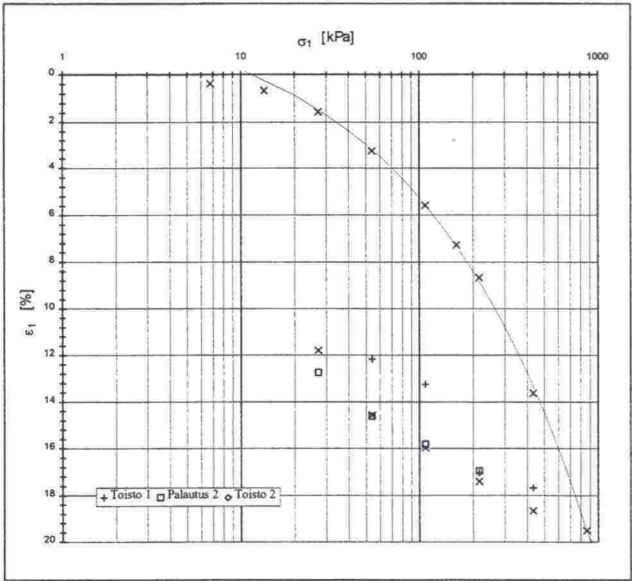
Tolla, P., Lojander, M. Kinani, K. The characteristic deformation for the Haarajoki Test Embankment. XIII ICSMFE, Istanbul 2001.

Vepsäläinen, P., Lojander, M., Takala, J., Törnqvist, J., The Pixel Layer Model: Theory, Practical Aspects and Examples. NGM-2000. XIII Nordiska Geoteknikermötet Helsinki 5.-7.Juni 2000. Finnish Geotechnical Society r.y. Helsinki 2000.

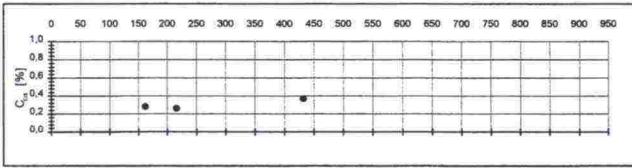
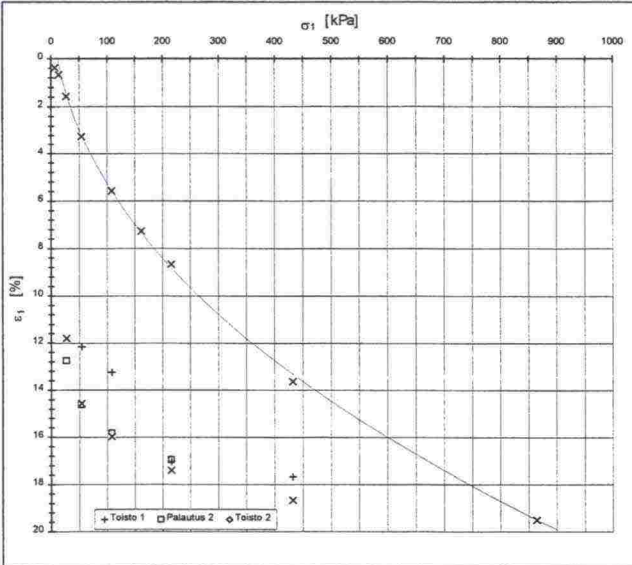
LIITE 1A.

Haarajoen koepenger
Ödometrikokeiden tuloksia

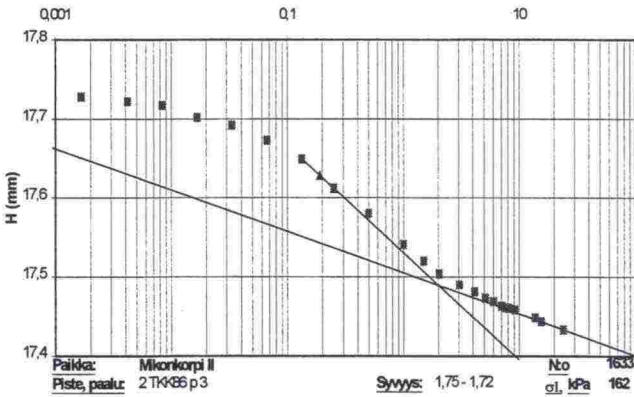
Paikka: Mikonkorpi II	Syvyys: 1,72 - 1,75		N:o 1633
Piste: 2 p 3 TKK86			
σ_{v0} (kPa) = -	$\beta_1 = 0,460$	$\beta_2 = 1,015$	Huom. -
σ_{v0} (kPa) = 60	$m_1 = 25,91$	$m_2 = 56,66$	



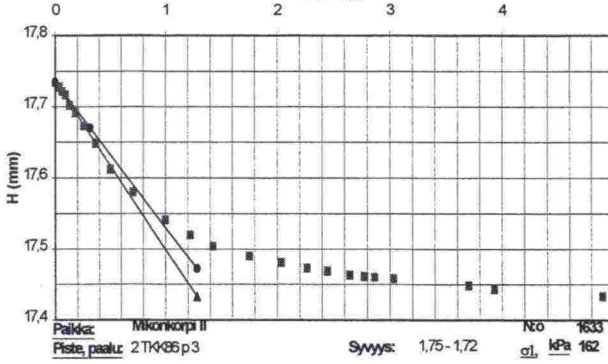
Paikka: Mikonkorpi II	Syvyys: 1,72 - 1,75		N:o 1633
Piste: 2 p 3 TKK86			
σ_{v0} (kPa) = -	$\beta_1 = 0,460$	$\beta_2 = 1,015$	Huom. -
σ_{v0} (kPa) = 60	$m_1 = 25,91$	$m_2 = 56,66$	



AIKA-PAINUMA-KUVAAJA, CASAGRANDE
LOG t (h)

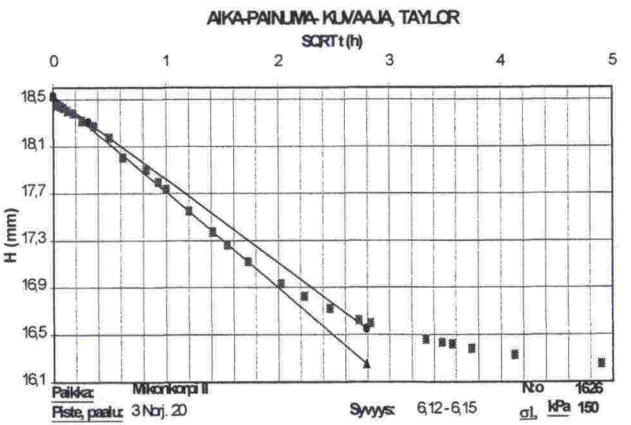
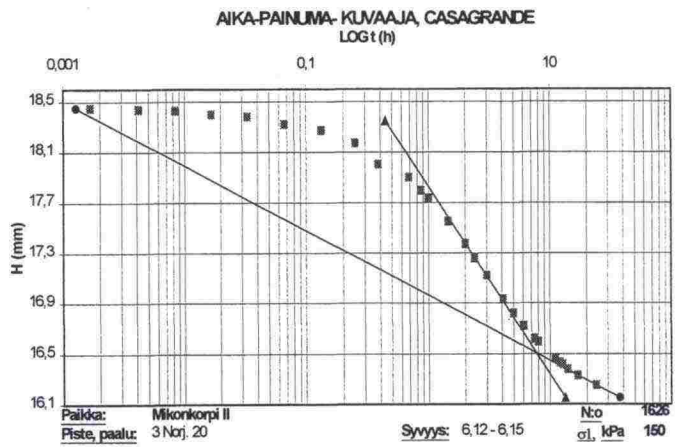
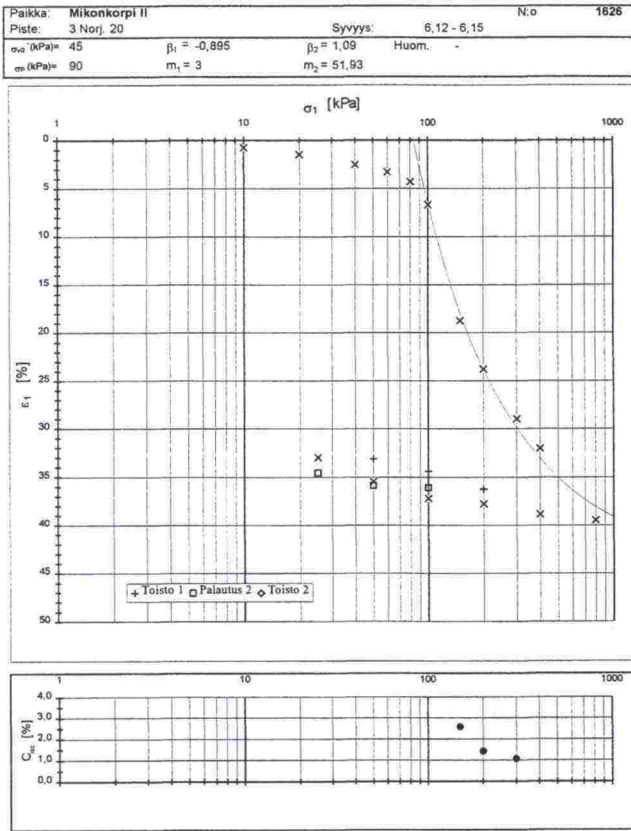
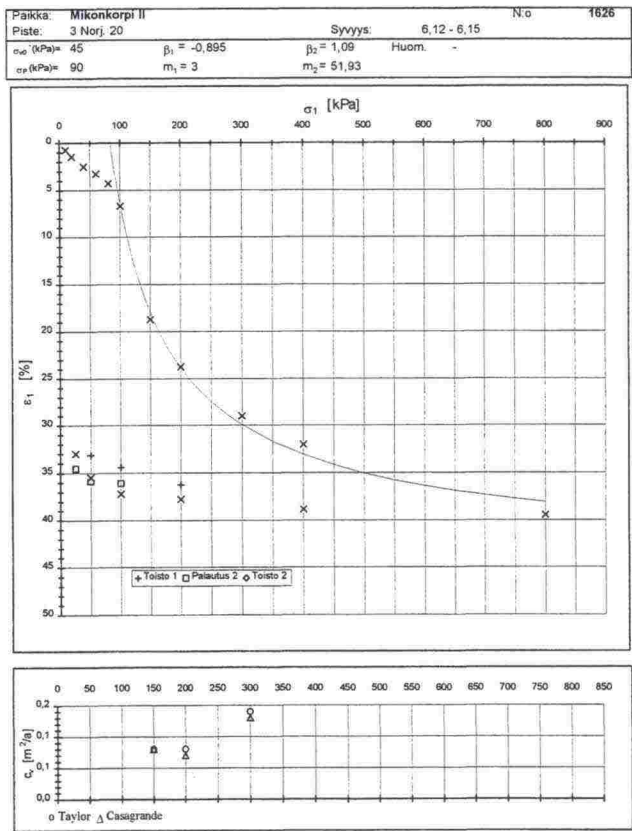


AIKA-PAINUMA-KUVAAJA, TAYLOR
SQRT t (h)



LIITE 1B.

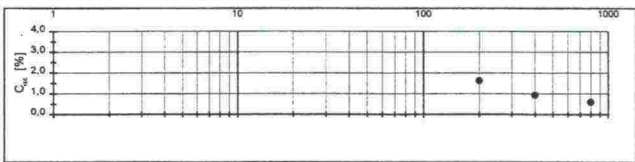
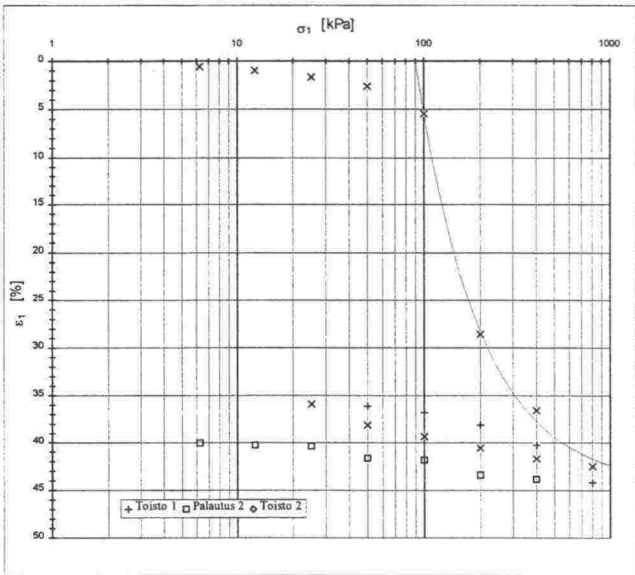
Haarajoen koepenger
Ödometrikokeiden tuloksia



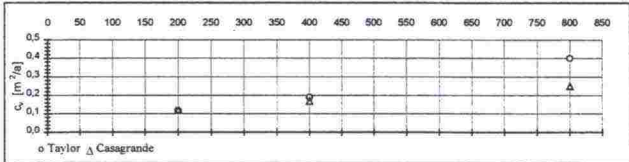
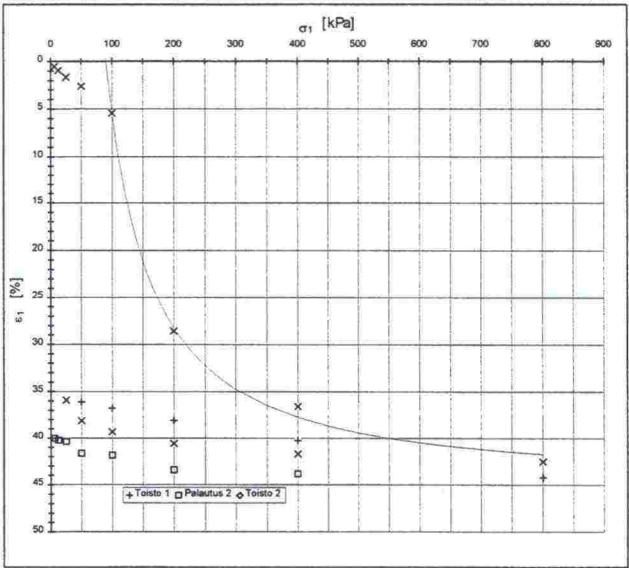
LIITE 1C.

Haarajoen koepenger
Ödometrikokeiden tuloksia

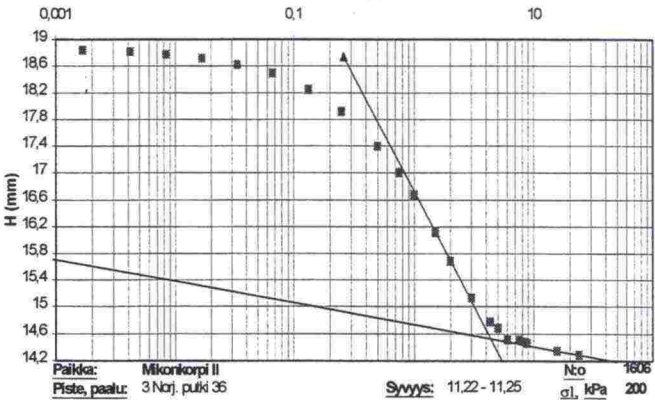
Paikka:	Mikonkorpi II	N:o	1606
Piste:	3 Norj. putki 36	Syvyys:	11,22 - 11,25
σ_{v0} (kPa)=	70	$\beta_1 = -1,255$	$\beta_2 = 0,895$ Huom. -
σ_p (kPa)=	95	$m_1 = 2,04$	$m_2 = 79,83$



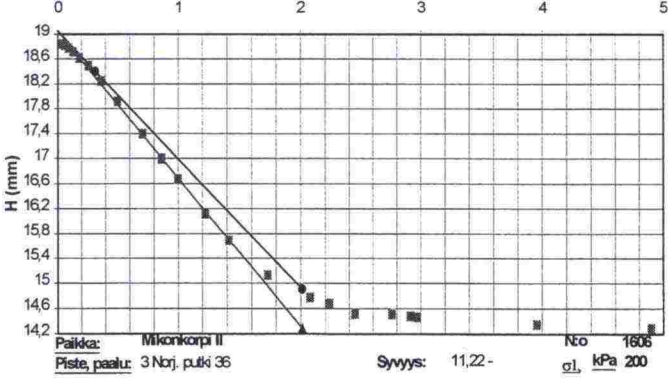
Paikka:	Mikonkorpi II	N:o	1606
Piste:	3 Norj. putki 36	Syvyys:	11,22 - 11,25
σ_{v0} (kPa)=	70	$\beta_1 = -1,255$	$\beta_2 = 0,895$ Huom. -
σ_p (kPa)=	95	$m_1 = 2,04$	$m_2 = 79,83$



AIKA-PAINUMA-KUVAAJA, CASAGRANDE
LOG t (h)



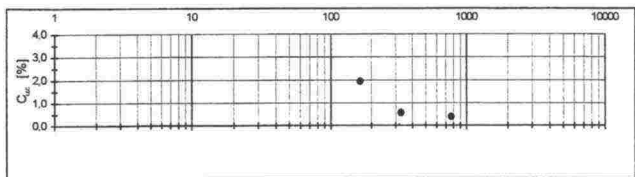
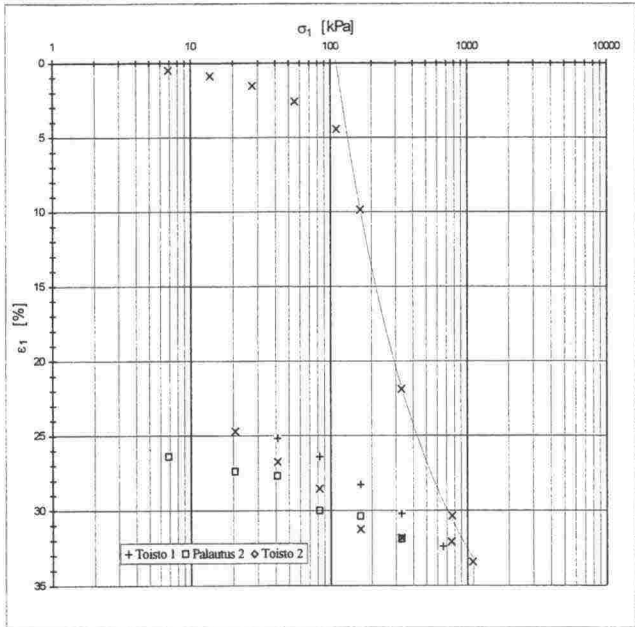
AIKA-PAINUMA-KUVAAJA, TAYLOR
SQRT t (h)



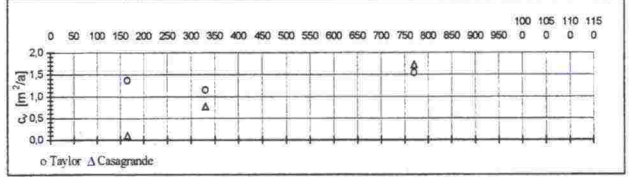
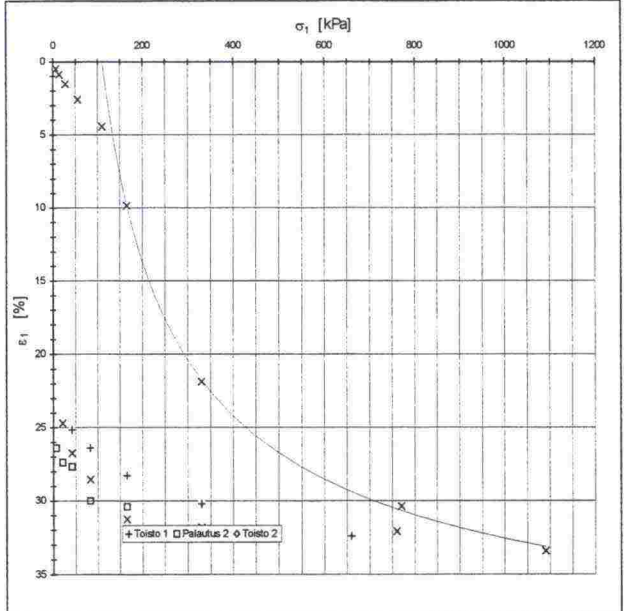
LIITE 1D.

Haarajoen koepenger
Ödometrikokeiden tuloksia

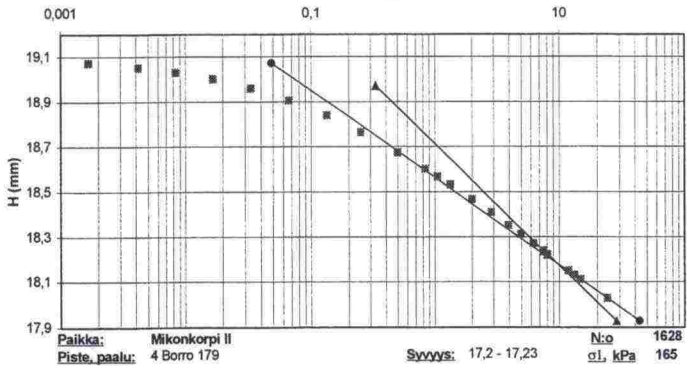
Paikka:	Mikonkorpi II			N:o	1628
Piste:	4 Borro 179	Syvyys:		17,2 - 17,23	
α_w (kPa)=	82	$\beta_1 = -0,645$	$\beta_2 = 0,515$	Huom.	-
σ_p (kPa)=	129	$m_1 = 3,39$	$m_2 = 47,82$		



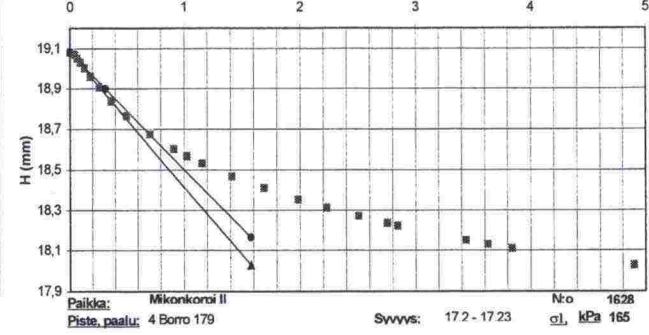
Paikka:	Mikonkorpi II			N:o	1628
Piste:	4 Borro 179	Syvyys:		17,2 - 17,23	
α_w (kPa)=	82	$\beta_1 = -0,645$	$\beta_2 = 0,515$	Huom.	-
σ_p (kPa)=	129	$m_1 = 3,39$	$m_2 = 47,82$		



AIKA-PAINUMA- KUVAAJA, CASAGRANDE
LOG t (h)



AIKA-PAINUMA- KUVAAJA, TAYLOR
SQRT t (h)



LIITE 2.

Vedenläpäisevyyskertoimen määrittäminen ödometrikoe tuloksista

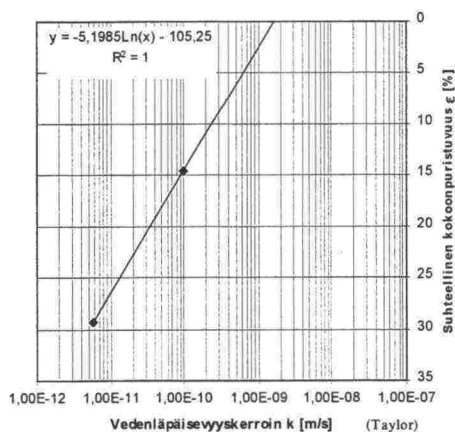
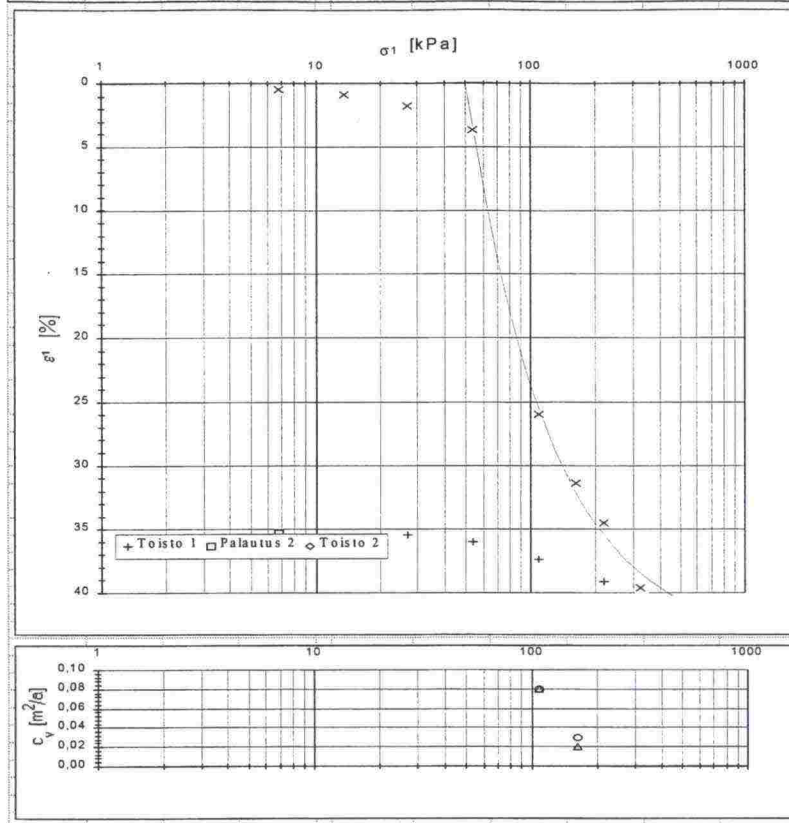
Painumalaskentakilpailusta saatujen kokemusten perusteella Teknillisellä korkeakoululla on muutettu ödometrikokeiden tulostusta siten, että yksittäisistä kuormitusportaista laskettavien konsolidaatiokertoimien arvojen lisäksi samoilta kuormitusportailta lasketaan myös vedenläpäisevyyskertoimien arvot. Suhteellisen kokoonpuristuman ja vedenläpäisevyyden (logscale) avulla määritetään 0-muodonmuutostasoa vastaava vedenläpäisevyyden arvo sekä myös vedenläpäisevyyden pieneneminen muodonmuutoksen kasvaessa.

Samassa yhteydessä on myös kehitetty ödometrilaite, jossa voidaan tavanomaisen kuormitusportaan jälkeen järjestää vedenläpäisevyyskoe muuttuvan putouskorkeuden menetelmällä. Ödometrinäytteen alapäästä johdetaan vettä näytteen läpi 0,5m alkuputouskorkeudella ja seurataan putouskorkeuden alenemista 1 vrk ajan. Putouskorkeus-aika kuvaajan kaltevuudesta lasketaan vedenläpäisevyyskertoimen arvo. Sama koe toistetaan useammalla kuormitusportaalla ja piirretään tulokset vedenläpäisevyyskerroin (logscale) – suhteellinen kokoonpuristuma-koordinaatistoon.

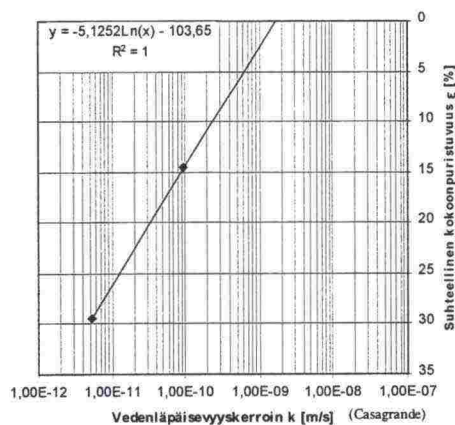
Seuraavassa kuvasarjassa on esitetty yhden vedenläpäisevyysödometrilla tehdyn kokeen tulostus. Tulostuksessa on esitetty myös sekundaaripainuman kertoimen riippuvaisuus jännitystasosta tai muodonmuutostasosta.

Vedenläpäisevyyslaskelman ja suhteellisen kokoonpuristuman välinen riippuvaisuus voidaan määrittää myös jatkuvapuristeisella ödometrikokeella. Jatkuvapuristeisesta ödometrikokeesta saadaan jatkuva konsolidaatiokertoimen ja jännityksen välinen riippuvaisuus, jolloin laskija voi paremmin kuin portaittaisessa kokeessa valita kertoimen arvon oikealta jännitysväliltä.

Paikka: HAARAJOKI, Koepenger	Syvyys: 4,34-4,37	N:o 1601
Piste: 2 p2 TKK86		
σ_{vs} (kPa) = 27	$\beta_1 = -1,120$	$\beta_2 = 0,675$ Huom. -
σ_p (kPa) = 53	$m_1 = 4,43$	$m_2 = 50$



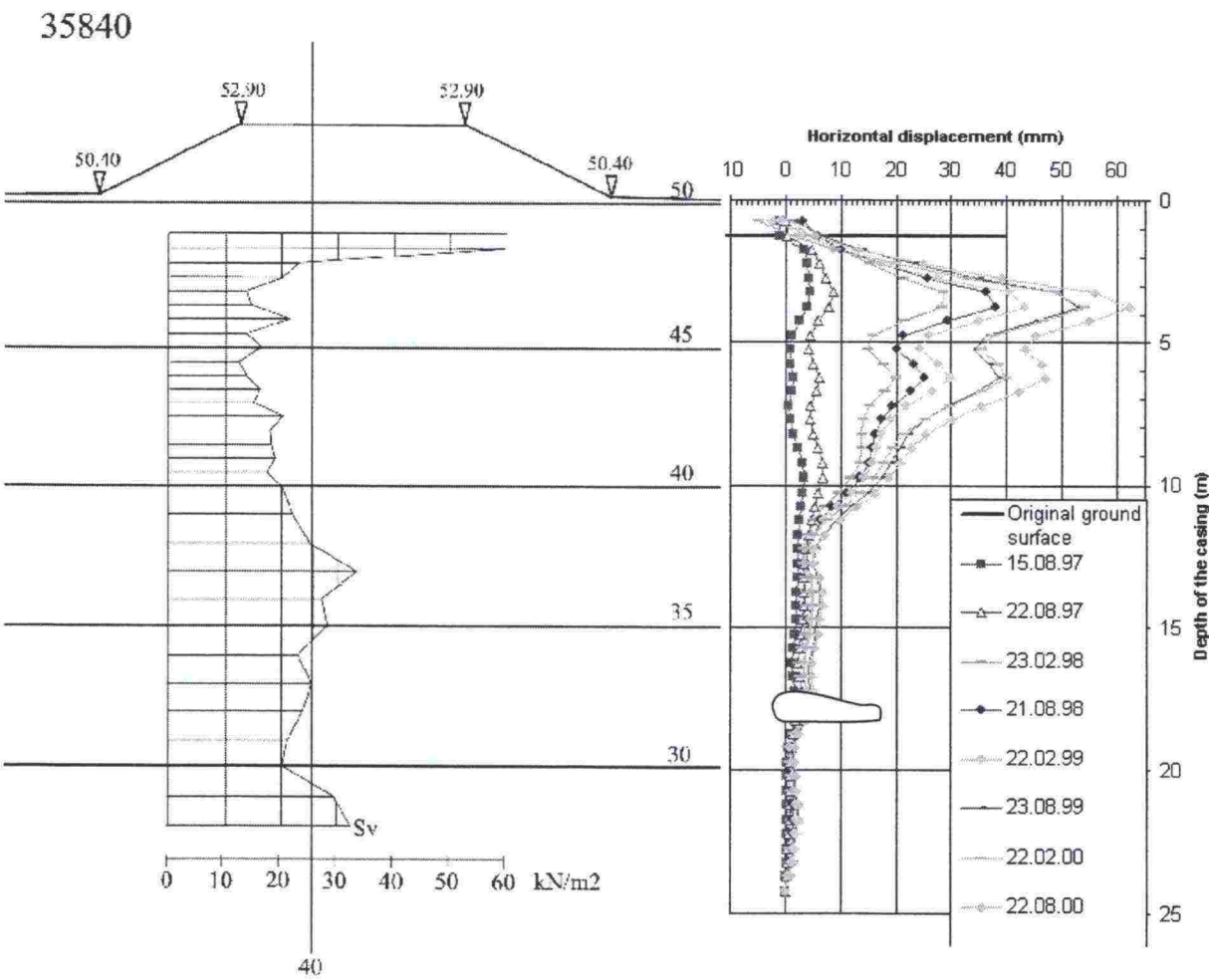
TAYLOR (trendline)				
k_1	0,7839	$\cdot 10^{-9}$	m/s	
β_k	8,65			
(oma valinta)				
k_1		$\cdot 10^{-9}$	m/s	
β_k				



CASAGRANDE (trendline)				
k_1	1,6482	$\cdot 10^{-9}$	m/s	
β_k	8,47			
(oma valinta)				
k_1		$\cdot 10^{-9}$	m/s	
β_k				

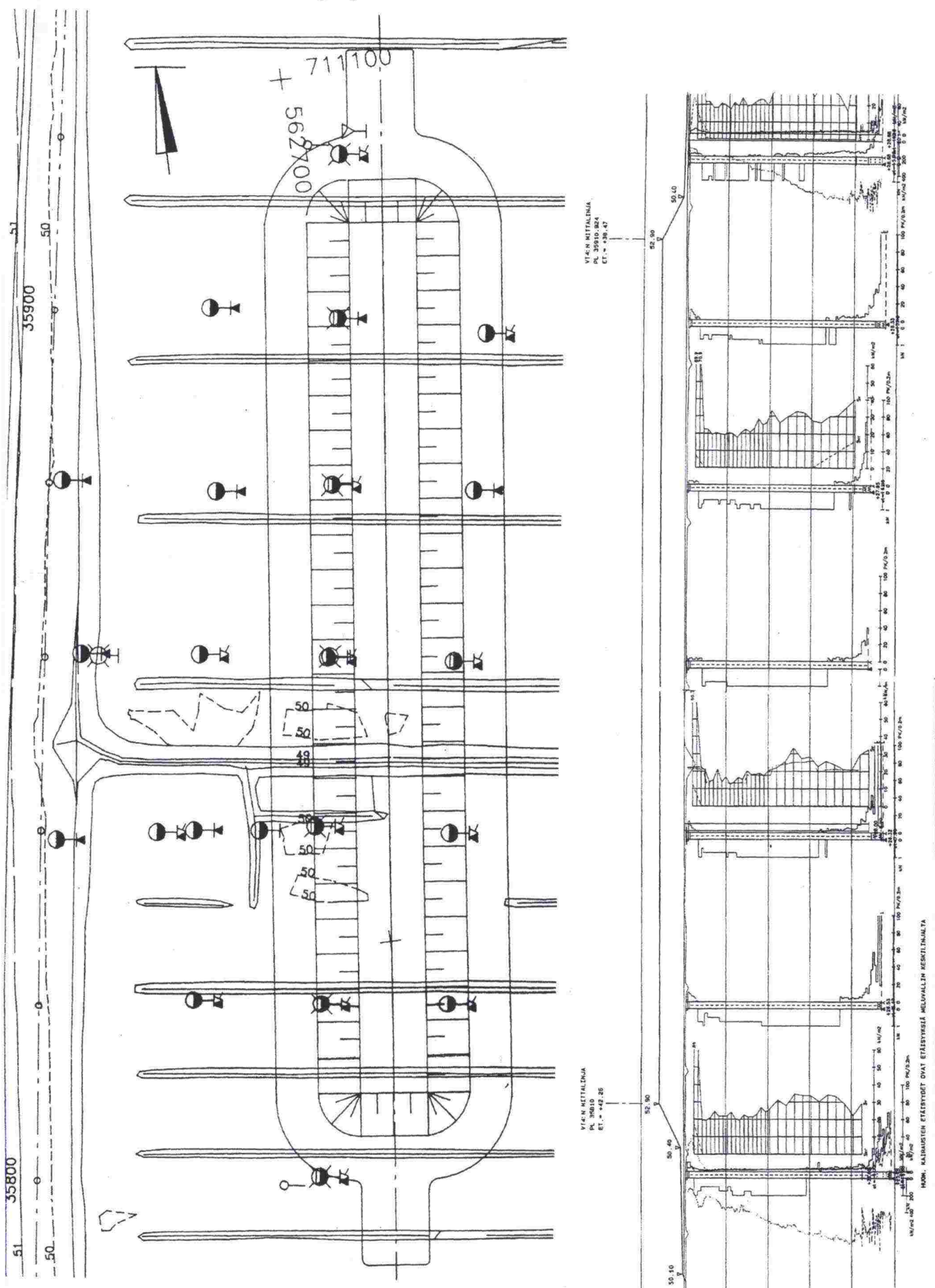
LIITE 3.

Siipikairalla mitattu suljettu leikkauslujuus ja mitattu sivusiirtymä
Maanvarainen pengerr



LIITE 4.

Koepenkereen tasokuva ja pituusleikkaus.



ISSN 1457-9871
ISBN 951-726-803-3
TIEH 3200700